

# 압력용기, 배관등에 있어서 파단전 누설 안전대책

남 기 우

부산수산대학교 재료공학과 교수



●1956년생  
●재료강도학을 전공하였으며, 재료의 균열진전, 수명예측등을 연구하고 있고, 복합재료 및 고분자재료에 관심이 있다.

## 1. 머리말

액화가스 운반선, 원자력발전 Plant 및 초고압화학 Plant등과 같은 중요한 대형구조물에 있어서는 근년 LBB설계법(leak before break design)이 주목받고 있다. 이 LBB설계법이라는 것은 내용물의 누설이 생기는 관통균열이 만일 발생하였다고 하여도, 대규모 파괴가 일어나지 않도록 충분히 강도와 인성을 갖는 재료의 사용을 전제로 하고 있다. 이것은 일종의 fail safe design이라고 할 수 있다. 즉, 그림 1에 나타내는 것 같이 길이  $a_0$ , 깊이  $b_0$ 의 결함이 1, 2, 3과 같이 진전할 때, 1의 상태가 한계균열 치수라면 사전에 아무런 징후도 없이 돌연 불안정파괴가 생기기 때문에 매우 위험하다. 이것에 대하여 3의 상태가 한계치수라면, 그 이전 2의 상태에서 내용물의 누설이 생기기 때문에 균열의 발견이 쉽게 된다.

이 LBB설계법에 있어서는 표면에 발생한 미소균열이 성장해서 판두께를 관통하기까지의 수명과 판두께 관통시의 균열형상, 또는 균열이 관통한 직후부터 앞면과 뒷면에서의 균열 길이가 같은 2차원균열로 성장하기까지의 성장특성을 정도 좋게 평가할 필요가 있다고 생각된다.

이와 같은 관점에서, 판두께를 관통하기까지의 균열성장 거동에 관해서는 많은 연구자들

에 의해 활발한 연구가 실시되어져 왔고, 그 특성은 거의 해명되었다고 말할 수 있다. 그러나, 표면균열이 관통해서 완전한 2차원균열로 성장하기까지의 거동에 관해서는 불명한 점이 많다. 그런데 이러한 균열관통 직후의 거동은 아래에서 설명하는 이유와 같이, LBB설계 및 구조물의 건전성 평가상 지극히 중요하다고 생각된다. (1) IMO(international maritime organization)의 액화가스선 구조규칙에 type B의 탱크는 항해중에 만일 누설이 발생하여도 최저 15일간은 그 균열이 대규모 파괴로 발전하지 않는 것의 보증을 요구하고 있다. (2) 원자력발전 플랜트등의 압력용기 및 배관등에 있어서는, 용접부등에서 만일 균열이 생기면 순간적인 파단이 일어나는 큰 사고를 초래할 두려움이 있다는 것을 상정하여, 파단방호대책이 마련되어 있다. 그러나 이와같은 경우 순간적인 파단이 일어나지 않고 충분한 누설속도와 개구면적의 확보가 보증되면 안전성 및 경제성의 견지에서 상당히 유익하다. (3) 일반 플랜트에 있어서도 만에 하나 누설이 발생한 경우,

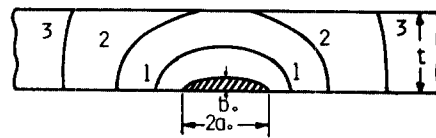


그림 1 한계균열 치수와 판두께와의 관계

대책을 검토하기 위해 그 부분에 사람들이 모여들 가능성이 높다. 따라서, 누설이 발생하였다고 하여도, 그 후의 일정 기간내에 파괴가 발생하지 않음을 보증하여 둔다는 것은 안전성의 견지에서 중요하다. (4) 판구조물에 있어서도, 잔여수명을 정확하게 평가하기 위해서는 표면균열의 관통전후 거동을 평가하는 것이 필요하다.

이상과 같은 관점에서, LBB설계법의 방법과 각국에서 실시하는 연구동향을 소개하여, 압력 용기, 배관등의 제조시 재료의 선택, 설계 및 운전등의 안전대책에 참고가 되고자 한다.

## 2. 연구동향

LBB개념이 성립하면 액화가스선의 탱크 (type B) 건조비절감 및 원자로 냉각수 배관의 구속장치 철거가 가능하게 되어 건설비의 저감, 보수·점검등의 이익이 생기게 된다. 이와같은 관점에서 LBB설계법에 관련하여 각국에서는 활발하게 연구가 수행되고 있다. 이하 각국에서 실시되고 있는 연구동향을 소개한다.

### (1) 일본

일본에 있어서의 LBB연구는 조선분야에서는, 일본 조선연구 협회 RR3M위원회에서 방형독립형 탱크방식 저온형 LPG선의 탱크 (type B로서 평가)에 LBB가 성립할 것인지는 아닌지의 평가법을 검토하였다. 그 때의 검토 흐름도를 그림 2에 나타낸다. 또 type B의 입증을 위한 파괴기구해석도 실시하고 있고, 파괴관리에 의한 손상허용설계가 도입되고 있다. 이와는 별도로, LBB의 관점에서 피로균열의 전파와 취성균열 발생시의 균열치수등에 관한 연구가 활발하게 실시되어져 왔다. 한편 발전 플랜트 분야에서는 스테인리스 배관에 생긴 응력부식균열에 의한 균열발견을 계기로, 민간연구소, 원자력공학센터 및 일본원자력연구소에서 진행되어져 왔다. 히다찌 중공업에서는 여러가지 형상의 표면균열을 갖는 스테인리스강

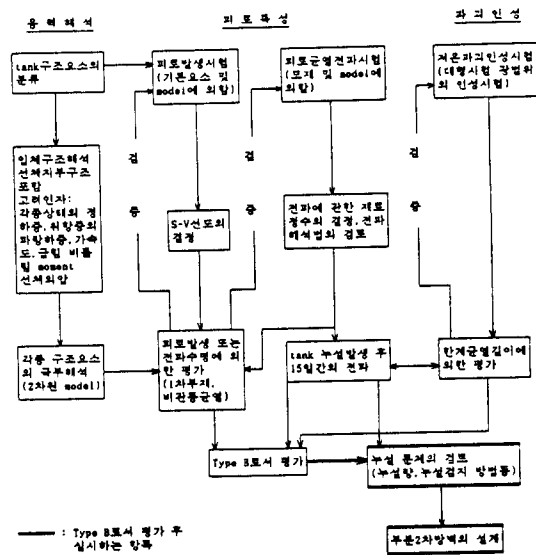


그림 2 LPG Tanker의 type B 평가에 대한 flow chart

평판 및 배관의 시험을 하여, 실단면응력기준에 의해 관통하중 및 파괴하중을 유도하고 있다. 이시가와지마하리마 중공업에서는 STS42 배관을 사용하여 피로결함이 관통한 후 누설량을 실험적으로 구하고 있다. 원자력공학센터에서는 LBB에 대한 평가를 하기 위해 배관계의 컴플라이언스를 고려한 실험을 하였다. 균열의 안정성장에서 불안정성장에서의 이행, 동적하중의 효과, 용접의 균열진전에의 효과, 컴플라이언스의 영향등이 조사되었다. 또 원자방향에 표면균열을 갖는 배관에 고온 고압의 물을 공급하면서 컴플라이언스를 부여 한 반복인장시험을 행하여, 배관에서의 균열 진전거동 및 실 단면응력기준에 의한 배관의 누설과 파단의 평가가 연구되었다. 더우기, 사고시의 배관 급냉을 모의한 가혹한 열충격시험도 실시되었다. 일본 원자력연구소에서는 탄소강관 및 스테인

리스강 배관을 사용하여 인장시험 및 4점굽힘 시험을 실시하여, J적분에 의한 tearing instability criterion에 의한 연성불안정파괴평가, 실단면응력기준에 의한 최대하중시의 붕괴 모멘트를 평가하고 있다. 더우기, 일본용접협회의 3 dynamic fracture, 4 dynamic fracture, 5 dynamic fracture 소위원회에서는 일본원자력연구소의 위탁연구로서 소형시험편에 의한 연성파괴의 불안정화 현상 해명을 위한 동적 탄소성 파괴인성시험, 표면균열 갖는 평판시험편에 의한 연성불안정파괴, 표면균열의 동적전거동 및 노치를 갖는 강관의 동적 불안정파괴거동 해명을 위한 구조모델 시험이 실시되었다.

그러나, 아직 배관파단을 생각한 기준은 없고, LBB개념의 도입기준에 관한 검토작업이 실시되고 있다.

(2) 미국

그림 3에 나타내듯이 1974년 Dresden 2호기 재순환계 배관의 SCC(응력부식균열) 발생을 계기로 하여, 파단전누설설계(leak before break design) 연구가 활발하게 되었다. 특히 전력연구소의 위탁에 의한 연구가 battelle columbus

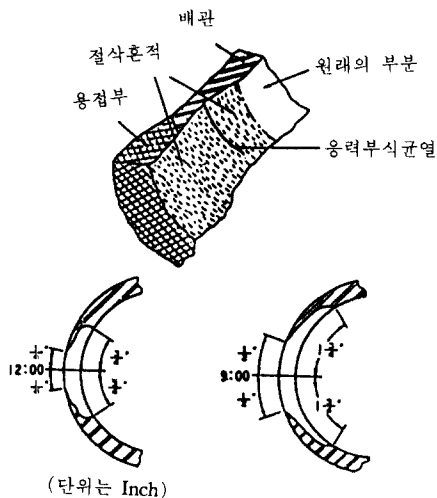


그림 3 Dresden 2호로 4Inch배관에서 발견된 응력 부식균열

연구소에서 실시 되었다. 이것은 주방향 균열을 갖는 배관재료의 굽힘하중에 의한 파괴시험이고, 실단면응력 조건과 J적분 tearing modulus 조건의 적용 가능성을 검토했다. 또 degraded piping program phase II에 있어서는 광범위한 배관재료의 시험과 연구개발을 전개하고 있다. 더우기 원자력규제국에서는 배관 시험을 주목적으로 한 국제연구협력계획을 제안하고, battelle columbus 연구소를 중심으로 세계각국이 참가하여 1986년부터 연구를 개시하고 있다. 본 연구는 대규모인 배관파단시험이고, 동적하중하에서의 배관계의 LBB평가와 배관파단 data base의 개발, 정보교환이다.

그리고, ASTM STP579는 LBB의 문제를 취급한 symposium의 논문 19편을 수록하고 있고, 연성불안정파괴의 연구를 추진한 P.C. paris 등의 논문도 수록하고 있다. 또한, 1983년 겨울에 발표된 ASME Code Sec. XI의 결합허용기준은 battelle columbus 연구소에서 실시한 파열시험의 결과를 G.T. Hahn이 정리한 것을 기초로 하고 있다.

이와 같은 미국내의 연구실적을 근거로하여, 배관설계에 파단전누설설계 개념이 도입되고 있는 실정이다.

(3) 서독

대학국립재료연구소(MPA), 국내생산회사(KWU) 등의 연구기관에 의해 대형시험편을 사용한 파단전누설설계 연구가 실시되져 왔다. 시험은 주방향 및 축방향의 관통균열과 내면균열을 갖는 배관시험편을 중심으로 실시되어, 실기조건하의 파단전누설 성립성이 검토되었다. 이와같은 연구결과를 근거로 1981년 파단전누설 개념에 의한 구조설계 기준이 도입되어 있다. 이 기준에서는 guillotine 파단 대신에 소규모인 균열개구가 상정되도록 배관의 상정개구면적을 0.1F(F는 배관단면적)로 하고 있다. 즉, 0.1F에서 누설량을 평가하게 되었기 때문에, 구속장치를 설치할 필요성이 없어졌다. 이와같이 하여 배관설계의 합리화가 실 구조물에 있어서 실용화되고 있는 실정이다.

기타 영국, 이탈리아, 캐나다, 스웨덴 등의 제 외국에서도 LBB개념 도입을 위한 실험을 실시하고 있지만, 대부분이 정적하중에 의한 실험이고, 피로하중하의 실험은 거의 없는 실정이다. 더구나, 피로하중하의 균열관통후 균열진전거동에 관한 연구는 저자들에 의한 일련의 연구를 제외하고는 전무한 실정이다.

### 3. Leak Before Break의 방법

#### 3.1 정적하중하에서의 LBB

Irwin에 의해 제안된 LBB 설계기준은 그림 4에 나타내듯이 관통한 때의 표면균열 길이로 판두께 2배의 균열길이를 상정하고 있다. 이 상태에서 항복응력과 같은 외력이 작용하여도  $K$ 값이  $K_{Ic}$ 값을 넘지않을 것을 조건으로 하고 있다.

1967년 duffy등은 파이프에서 축방향균열의 LBB조건을 유도하고 있다. 그들은 판두께방

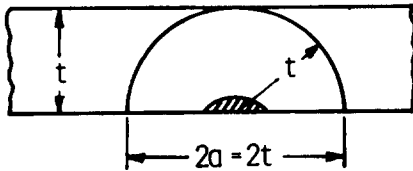


그림 4 LBB설계상의 균사

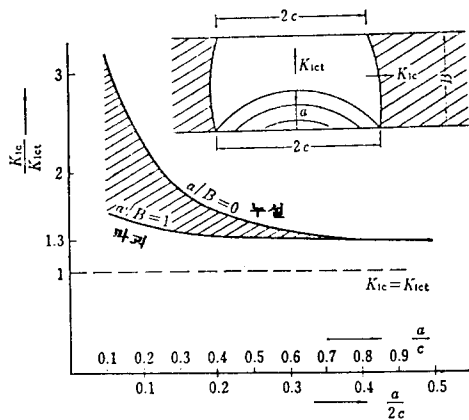


그림 5 Duffy 등에 의한 LBB 조건

향으로 균열이 진전하는 경우, 균열선단의 조건은 plain strain에 가깝다고 생각하여 이때의 파괴인성을  $K_{Ic}$ 라고 하고, 또 축방향으로 균열이 진전하고자 하는 경우, plain stress상태에 가깝다고 생각하여 이 때의 파괴인성을  $K_{Ic}$ 라 한다. 이들의 값과 균열형상과의 관계를 사용하여, 그림 5에 나타낸다. 이 그림에 의하여 파괴인성  $K_{Ic}$ 가 클수록, 균열이 깊을수록 LBB실험 가능성이 높다는 것을 제시하였다.

Hahn이 유도한 LBB조건은 용기 또는 배관에 존재하는 관통균열은 평판에 존재하는 어떤 균열길이와 같다고 생각하여, 한계응력을 유도하고 있다. 더우기 변형이 크게 된 경우는 파괴 criterion으로서 소성유동응력(flow stress criterion)  $\sigma^*$ 를 채용하는 것이 좋다고 제안하고 있다.

$$\sigma^* = \sigma' / [1 + 1.61c^2/Rt]^{1/2} \quad (1)$$

여기서,  $\sigma' = (1.04\sigma_y + 7)$

또 표면결함에 대해서는 잔존단면부(ligament)가 파단하여 관통결함으로 성장하기 위한 조건을 유도하고 있다.

$$\sigma^* = \sigma' [1 - (a/t)] / \{ [1 - (a/t)] / (1 + 1.61c^2/Rt)^{1/2} \} \quad (2)$$

여기서  $a$ 는 깊이,  $c$ 는 표면균열길이의 절반,  $R$ 은 원통의 반경,  $t$ 는 판두께이다.

식(2)에서  $(1 + 1.61c^2/Rt)^{1/2}$ 이 값이 1에 가까워지면, 잔존단면부(ligament)가 파단하기 위해서는 결함이 지극히 깊지 않는 한, 주방향응력  $\sigma^*$ 은 소성유동응력(flow stress criterion)  $\sigma'$ 에 가까운 값이 되는 것을 나타내고 있다. 식(1), (2)의 결과를 그림 6에 나타낸다. 이 그림에서 파단전누설을 확보하기 위해서는 긴 잠재균열을 만들지 않을 것과 주방향응력을 낮게 억제 할 필요가 있는 것을 나타내고 있다.

Held등은 연성재료로 만들어진 표면균열채를 사용하여 인장시험하면, 균열은 처음에 판두께방향으로 성장하여, 균열이 판두께를 관통하면 하중은 일시적으로 저하한다. 계속하여

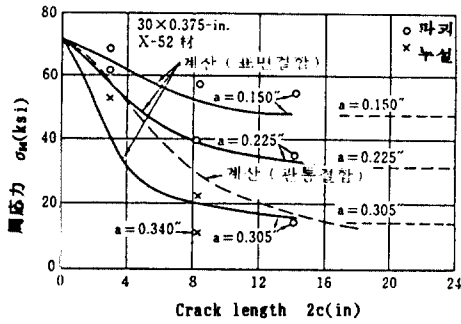


그림 6 Hahn에 의한 제안식과 실험결과

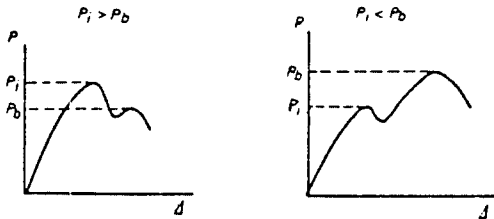
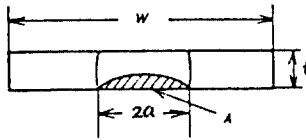


그림 7 표면균열을 갖는 인장시험편의 하중-변위 곡선

균열이 판폭방향으로 진전하면 다시 하중은 증가하여 극대값을 나타내는 것을 나타내었다. 이것을 그림 7에 나타낸다. 이것에서 관통시의 하중이 극대값보다 크면 파괴, 작으면 안정성장이라고 제안하였다.

또 Kanninen등은 균열이 성장을 개시 할 때의 하중과 균열이 판두께를 관통할 때의 하중을 구하기 위해 균열단면에 있어서 평균응력에 의한 정리를 하여, 실단면응력기준(net section collapse failure criterion)을 제창하고 있다.

$$\text{관통시의 하중 } P_i = \sigma_i (wt - A) \quad (3)$$

$$\text{관통후의 최대하중 } P_L = \sigma_b (W - 2a)t \quad (4)$$

여기서  $W, t$ 는 시험편의 폭 및 두께,  $A$ 는

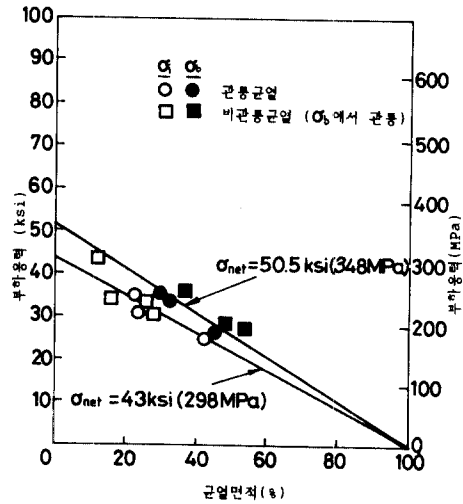


그림 8 304 stainless steel 노치 인장시험편의 균열발생응력과 균열의 판두께 관통응력

균열의 면적,  $2a$ 는 표면균열의 길이,  $\sigma_i$ 는 균열 발생시의 실단면응력,  $\sigma_b$ 는 최대하중시의 실단면응력이다. 그들은 stainless steel SUS 304의 균열형상 및 치수가 다른 표면노치, 관통균열 시험편의 실험을 실시하여 균열발생시와 최대하중시의 공칭응력을 구하여 그림 8과 같이 균열면적에 대하여 그린다. 이것에서 균열면적이 0 되는 응력치를 외추하여  $\sigma_i, \sigma_b$ 를 구한다. 그림 8은 205°C에서의 결과로  $\sigma_i = 43$  ksi,  $\sigma_b = 50.5$ ksi로 된다.

한편 Hasegawa등은 SUS304의 표면노치재 인장시험을 실시하여, 균열의 형상 및 치수가 판두께 관통하중 또는 붕괴하중에 미치는 영향을 조사하였다. 그들은 응력의 분포를 그림 9와 같이 가정하여 정도 좋게 계산될 수 있는 식을 유도하고 있다.

$$\text{관통시의 하중 } P_p = 2\sigma_p (w - l_0)t + \sigma_{er} \cdot (2a_0 t - A_c) \quad (5)$$

여기서  $A_c$ 는 초기균열의 면적,  $\sigma_{er}$ 는 공칭 파괴응력,  $\sigma_p = \sigma_u - (\sigma_u - \sigma_r)(d/t)$ ,  $l_0$ 는 초기 표면균열 길이의 절반이다.

$$\text{관통후의 최대하중 } p_b = 2\sigma_b (W - l_0)t \quad (6)$$

여기서  $0 \leq d/t < 0.1$  :  $\sigma_b = \sigma_u$

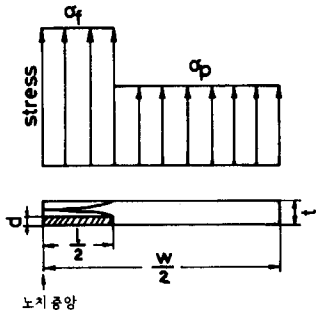


그림 9 표면균열이 판두께를 관통 할 때의 응력 분포 모델

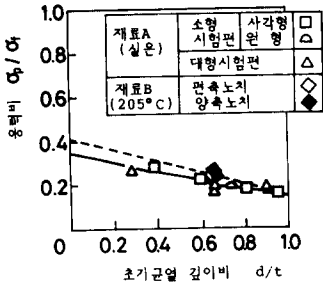


그림 10 표면균열의 판두께 관통시의 응력과 초기균열 길이의 관계

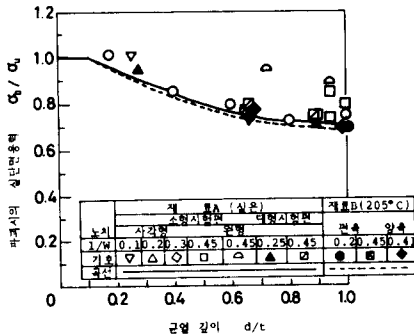
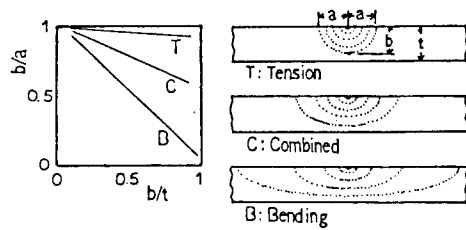


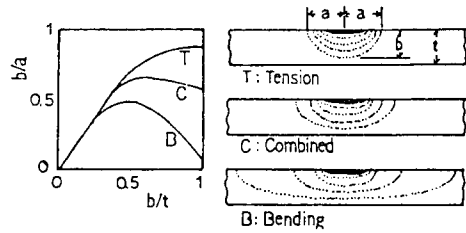
그림 11 파괴하중  $\sigma_b$ 와 초기균열길이  $d$ 의 관계

$$0.1 \leq d/t \leq 1.0 : \sigma_b = 0.617(\sigma_u - \sigma_v)(1 - d/t)^2 + 0.5(\sigma_u + \sigma_v)$$

식 (5) (6)에 의하여 관통시의 하중과 관통후의 최대하중을 비교하여 LBB 판정이 되도록 하고 있다(그림 10, 그림 11 참조).



(a) 상당히 작은 초기균열에서의 균열성장



(b) 낮고 긴 초기균열에서의 균열성장

그림 12 응력의 부하양식 및 초기결합 형상에 의해서 결정되는 균열형상변화경로

### 3.2 피로하중하의 LBB

이상에서는 정적하중을 받는 경우에 대한 것으로서, 실구조물에 보다 가까운 피로하중을 받는 경우에 대해서는 그 예가 거의 없는 실정이다.

Kawahara 등은 표면균열재가 피로에 의하여 균열이 진전하는 경우, 균열 형상변화를 그림 12에 나타내는 것 같은 경로를 나타낸다고 하여 다음과 같이 식으로 나타내고 있다.

$$b/[a^n - a_0^n]^{1/n} = A - B \cdot b/t \quad (7)$$

여기서  $A = 0.98 + 0.07\Delta\sigma_b / (\Delta\sigma_m + \Delta\sigma_b)$

$$B = 0.06 + 0.94\Delta\sigma_b / (\Delta\sigma_m + \Delta\sigma_b)$$

한편 저자들은 평판 및 배관시험편을 사용하여, 저사이클 및 고사이클 피로하중을 받는 경우에 대한 실험을 실시하여, 표면균열의 균열 관통거동 및 관통후의 균열진전거동에 대하여 조사하였다. 고사이클의 경우는 다음 기회로 미루고, 본 글에서는 저사이클의 경우, LBB 조건을 소개하기로 한다. 우선 관통시의 균열 형상은 식 (7)을 사용하여  $\sigma_b = 0$ 인 경우, 즉

인장응력만을 고려하면, 판두께 관통시 ( $b=t$ ) 는  $t/(a_p^n - a_o^n)^{1/n} = 0.98 - 0.06(t/a_p)$ 로 주어진다. 여기서 우변 2항의 판두께 관통시의 표면균열길이  $a_p$ 가 판두께  $t$ 와 같다고 가정하면, 판두께 관통시의 표면 균열 길이  $a_p$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$(a_p/t)^n = (a_o/t)^n + (1.087)^n \quad (8)$$

여기서  $a_o$ 는 초기표면균열 길이,  $n=m/2+1$ ,  $m$ 는 피로균열전파법칙에서 응력확대계수의 변동폭  $\Delta K$ 의 지수이다. 식 (8)은 저응력하에서의 피로균열에 대해서 타당성이 확인되어 있지만, 고응력하에서의 피로균열에 대해서도 적용이 될지 명확하지는 않다. 그래서 저자들이 실시한 연구결과에서 얻어진 관통시의 표면균열길이  $a_p$ 를 비교하여 그림 13에 나타낸다. 그림중에는 저응력하에서 얻어진 결과도 나타내고 있다. 이 그림에서는 실험에서 얻어진  $a_p$ 와 식(8)에 의한 결과가 좋은 일치를 나타내고 있다.

그리고, 균열이 관통할때의 균열형상은 LBB조건을 검토하는데 중요한 것이라고 생각하여, 실험에서 얻어진 파단면에서 그림 14와 같이 model화 해서 피로하의 LBB하중  $P_{LBB}^F$ 를 유도하였다.

$$P_{LBB}^F = H \cdot \sigma_u \cdot (2Wt - \pi a_p t / 2) \quad (9)$$

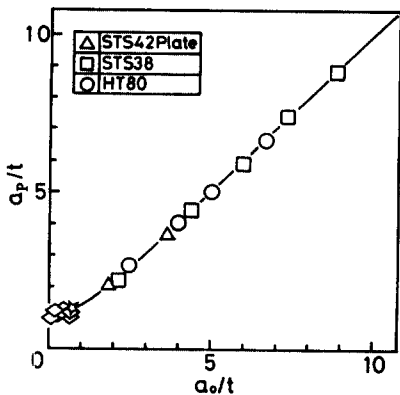
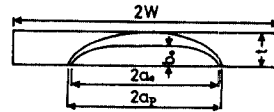
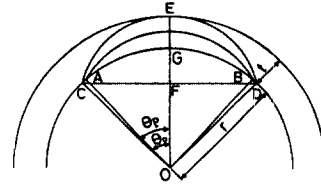


그림 13 관통시 표면균열의 계산치와 실험치의 비교

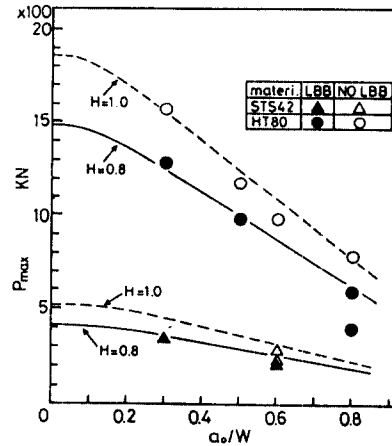


(a) 平板試驗片

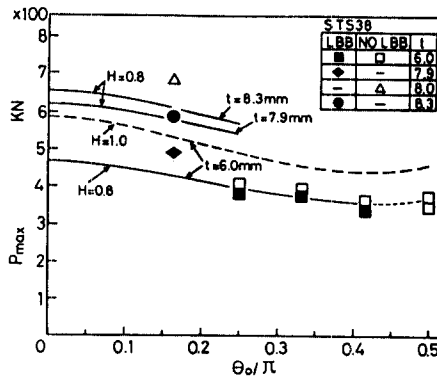


(b) 配管試驗片

그림 14 높은 반복응력하에서의 LBB하중을 평가하기 위한 모델



(a) 平板試驗片



(b) 配管試驗片

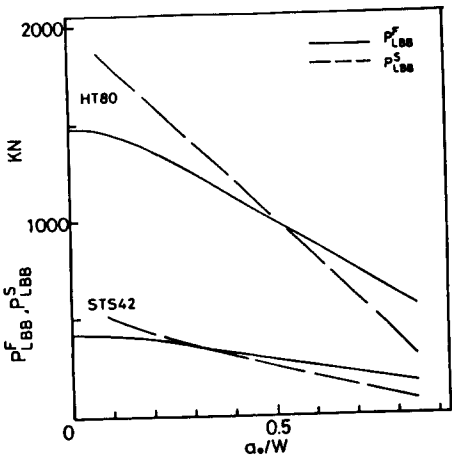
그림 15 LBB하중의 실험치와 계산치의 비교

$$P_{LBB}^F = H \cdot \sigma_u \cdot [r^2 \{ \pi \theta_p / 180 - (\pi/2) \sin \theta_p + (\pi/2 - 1) \sin \theta_p \cdot \cos \theta_p \} + r \cdot t \cdot \{ 2\pi - (\pi/2) \sin \theta_p \} + \pi t^2] \quad (10)$$

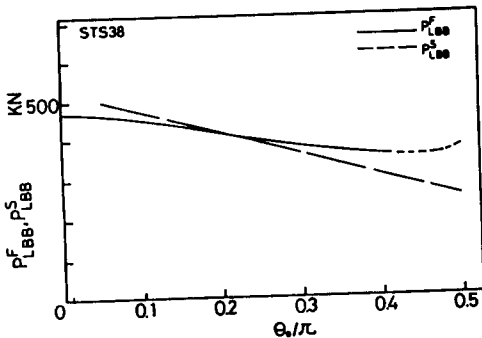
여기서  $H$ : 비례계수,  $\sigma_u$ : 인장강도,  $W$ : 판폭,  $t$ : 두께,  $a_p$ : 균열관통시의 표면길이,  $r$ : 배관의 내경,  $\theta_p$ : 배관시험편에서 관통시의 내측각도이다.

식 (9)(10)에 의해 피로하중하에서의 LBB, NO LBB의 판정은 아래식과 같다.

$$\begin{aligned} P_{max} < P_{LBB}^F & \quad \text{LBB} \\ P_{max} \geq P_{LBB}^F & \quad \text{NO LBB} \end{aligned} \quad (11)$$



(a) 平板試驗片



(b) 配管試驗片

그림 16 초기균열길이에 대한 정적 및 피로하중에서의 LBB 성립의 한계하중 비교

식 (9)(10)에서 얻어진  $P_{LBB}^F$ 와 실험치를 비교해서 그림 15에 나타낸다. 그림에서 LBB가 성립한 것은 검은기호이고, NO LBB로 된 것은 흰기호로 나타냈다. 식 (9)(10)에서  $H=1.0$ 으로 한  $P_{LBB}^F$ 는 실험치에 비하여 상당히 높은 값을 나타내고 있다. 그러나  $H=0.8$ 로 한 경우는 강종, 표면균열길이 및 시험편형상에 관계없이 실험치와 좋은 일치를 나타내고 있다.

다음에 식 (5)(6)에 의한 정적하중하의 LBB 성립의 한계하중  $P_{LBB}^S$ 과 식 (9)(10)에 의한 피로하중하의 LBB성립의 한계하중  $P_{LBB}^F$ 를 비교하여 그림 16에 나타낸다. 이것에서 정적하중하에서의  $P_{LBB}^S$ 는  $a_0/W$ 가 저하함에 따라서 거의 직선적으로 상승하는 경향을 나타내고 있다. 그러나, 피로하중하에서  $P_{LBB}^F$ 는  $a_0/W > 0.1$  범위에서 거의 직선적으로 증가하고,  $a_0/W < 0.1$ 범위에서 포화하여 거의 일정값을 나타내고 있다. 이상에서 정적하중과 피로하중에서의 LBB조건을 비교해 보면, 정적하중의 경우에는 초기균열의 길이와 깊이가 LBB조건을 결정하는데 중요한 인자인 것에 대하여, 피로하중의 경우에는 식 (10)(11)에서 알 수 있듯이 초기균열의 길이만이 지배를 하고, 깊이의 영향은 적다는 것을 보여준다.

#### 4. 맺 음 말

LBB설계법은 오늘날 같이 플랜트의 대형화 및 복잡화함에 따라서, 균열이 발생하였다고 하여도 기기의 점검시 발견하지 못하는 수가 있을 것이다. 이러한 경우에 있어서 LBB설계법은 fail safe design으로서 만일의 손상이 발생하더라도 플랜트의 안전성 및 경제성 확보를 위하여 매우 중요한 설계법이다.

이 LBB설계법은 위에서도 설명하였듯이 선진제국에서는 상당히 연구가 진전되어 있으나, 우리나라에서는 이 분야에 연구가 전혀 없는 실정이다. 특히 에너지자원이 부족한 우리나라로서는 LNG, LPG 가스의 수입에 있어서, 이



러한 저온가스를 운반할 tanker의 개발에 있어서도 LBB의 확보가 중요한 것이다. 또한 발전에너지원을 석유에만 의존하는 현재의 추세에서, 우라늄등에 의한 원자력발전으로 대체되어 가고 있는 현재 전 발전능력의 약 50%를 의존하고 있는 실정이다. 이러한 면에서 실제의 구조물이 일시에 파단이 일어나지 않고, 파단 신뢰성이 충분히 높다는 것을 실증하여 둔다는 것은 안전성평가상 지극히 중요한 것이다.

### 참 고 문 헌

- (1) 矢川의, 1984, 原子力工業, 30~11, 36.
- (2) IMCO[현재 IMO(1983년 개정)] 1975, Resolution A328(IX) : Code for the Construction and Equipment of Ships carrying Liquefied Gases in Bulk, Adopted on 12 Nov. 1.
- (3) 高矯의, 1981, 壓力技術, 19~1, 16.
- (4) 矢川의, 1984, 配管技術, 26~13, 51.
- (5) 川原의, 1975, 日本造船學會論文集, 137, 129.
- (6) Kaufman, J.G. et al., 1980, Trans. ASME, J. Eng. Mater. Technol., 102-7, 303.
- (7) Held, P.T., Mater. Scie. & Eng., 10(1972), 117.
- (8) Kanninen, M.F. et al., 1978, Nuclear Eng. & Design, 48, 117.
- (9) Hasegawa, K. et al., 1983, ASME Int. J. PVP, 95, 65.
- (10) Wilkowski, G.M. et al., 1985, Nuclear Eng. & Design, 89, 257.
- (11) Bartholome, G., et al, 1982, Nuclear Eng. & Design, 72, 97.
- (12) 南 起祐의, 1989, 壓力技術, 26-3(1988), 129. 26-5(1988), 300, 27-1, 41.

