

## 熔接缺陷의 許容限界 評價方法

康 聖 原\*

### Method of Assesment for Allowable Size of Weld Defects

S. W. Kang\*

#### 1. 서 언

용접구조물에서 용접이음부가 차지하는 비율은 매우 작은 경우가 많지만 용접이음부에는 각종 초기결함(이들 결함으로부터 진전하는 피로 균열, 환경에 의한 균열등을 포함) 및 용접 초기의 부정형을 비롯해서 형상적 불연속 등에서 유기되는 국부적인 응력, 변형률의 집중, 잔류응력, 구속응력, 용접금속이 갖는 숙명적인 야금적 특성의 불균일, bond부 및 HAZ부에서의 용접열 사이클에 의한 재질의 국부적 강도저하등 용접부의 강도를 저하시키는 인자들이 복합되기 쉽고, 용접구조물 전체의 내파괴 건전성평가에서 용접부의 파괴강도는 매우 중요하다.

용접구조물의 설계·시공의 목적은 소요성능의 확보에 있고 구조물이 사용중에 성능손실이나 불안정 파괴가 발생하지 않도록 하는 것이 주요요건이 될것이다.

현재의 제강기술수준에서 볼때 모재의 강도보다 오히려 용접부의 강도 특히 피로강도 및 파괴 인성을 적절하고 합리적으로 평가하는 것이 매우 중요하다고 해도 과언이 아닐 것이다.

용접부의 강도를 평가하는데 있어서 용접부에 발생하는 용접결함에 대한 평가는 매우 중요하며 이들 결

함에 대한 허용결함한계를 평가하여 보수 여부 및 용접구조물의 신뢰성을 평가 할 필요가 있다.

#### 2. 용접결함의 한계에 대한 평가의 개념

용접구조물의 제작과정 또는 사용중에 비파괴검사등에 의하여 결함이 발견된 경우 보수공사를 반드시 하지 않으면 안된다고 일반적으로 말할 수 없고, 관련되는 여러조건을 검토하여 상세한 평가를 거쳐서 합리적인 조치를 하는 것이 때로는 필요한 경우가 있다.

허용되는 결함인지 아닌지 하는 것은 그 결함의 존재가 원인이 되어 구조물의 안전성이나 기능을 상실하게 될 것인가 아닌가하는 점에서 판단해야만 한다. 이 경우 발견된 결함이 급작스런 취성파괴를 일으키게 되는지의 여부도 함께 고려하여 안정성과 기능적합성을 평가하지 않으면 안된다.

과거의 균열손상예를 참고하여 초기결함이나 피로에 의하여 발생한 균열의 성장과정에서 일어나는 현상을 살펴보면 Fig. 1과 같이 단계적으로 추정할 수 있을 것이다.

결함의 한계를 평가하기 위해서는 최근에 비약적으로 발전하고 있는 파괴역학의 적용이 필요하게 되지만

\* 정회원, 부산대학교 공과대학

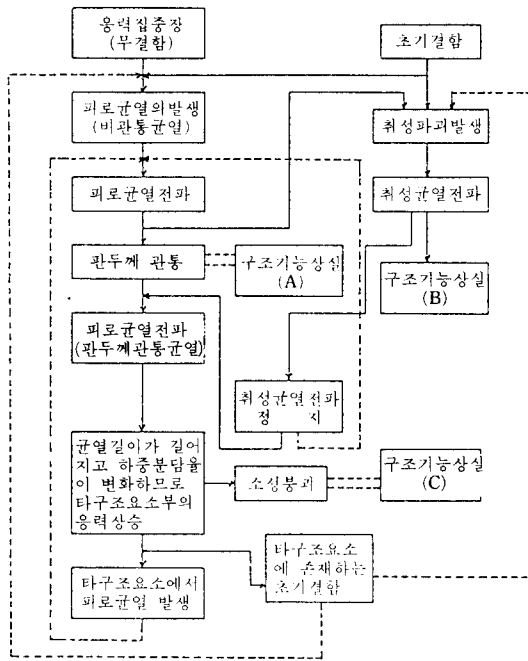


Fig. 1 균열 손상 과정

대형구조물에 대해서는 엄밀하게 파괴 파라미터를 산정하는 것은 방대한 계산과 비용이 필요하게 되기 때문에 될 수 있는 한 단순화와 공식화하여 결함허용도의 합리적 판단의 기준화에 이용하는 것이 중요하며 세계적으로도 이 방향으로 연구가 진행되고 있다.

다음항에서 이상에서 말한 관점으로 용접결함의 허용판정수법의 예를 설명하고자 한다.

### 3. 용접결함 한계에 대한 평가방법

용접부에 발생하는 결함에 대한 허용한계를 제시하고 있는 규격들로서는 미국의 ASME Code, Section XI, 영국의 BS-6235, 독일의 DIN-8563, 일본의 WES-2805 및 국제규격 ISO-6520 등이 있다. ASME Sec. XI에서는 평가된 결함치수가 허용결함이 아니면 보수하지 않고 사용할 수 있으나 그렇지 않을 경우에는 보수하여야만 한다. 그러나 결함기점에서 선형파괴역학에 의한 파괴해석을 행하고 사용기간중에 대하여 구조건전성이 보증되면 보수하지 않고 그대로 계속 사용할 수 있도록 허용하고 있다. ASME Sec. XI의 결함평가순서는 Fig. 2과 같다. BS-6235와 WES-2805는 COD 설계곡선을 사용하는 평가방법을

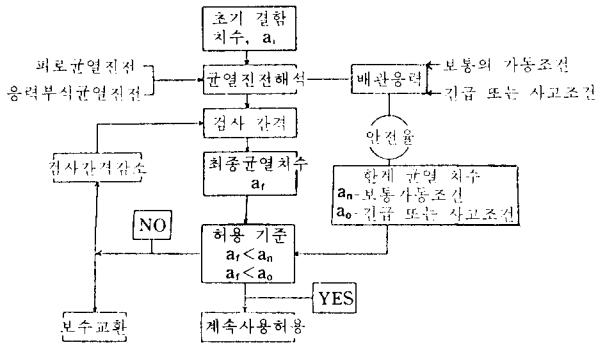


Fig. 2 ASME, Sec. XI의 결함 평가순서

채용하고 있다.

여기서는 결함의 한계평가수법의 구체적 예로서 일본용접협회규격 WES-2805를 예로 들고 그 수법에 대하여 설명하겠다.

WES-2805는 용접구조물에 사용되는 강재를 대상으로 하여 용융용접이음부의 균열 또는 이에 준하는 평면상결함의 취성파괴발생에 대한 평가방법을 규정하고 있다. 이 방법에 의하여 용접결함의 허용판정을 실시할 경우는 다음 사항에 대한 정확한 정보가 필요하게 된다.

- (1) 대상으로 하는 결함의 크기, 위치, 방향.
- (2) 결함이 존재하는 부위의 구조형상 및 용접부 형상.
- (3) 결함의 존재하는 부위의 응력(구조형상이 급변하는 곳에서는 응력집중을 고려한 응력분포를 구함).
- (4) 결함이 존재하는 부위의 파피에 대한 인성치( $\delta$  또는 샤르피 충격치).
- (5) 재료의 항복치.
- (6) 구조물의 사용온도.

#### 3.1. 결함치수의 표준화

용접이음부에 존재하는 초기결함은 일반적으로 복잡한 형상을 하고 있다. 이 상태로는 단순히 파괴역학해석을 하기 곤란하기 때문에 적당한 방법에 의하여 안전측의 추정이 되도록 배려하여 표준화 한다.

예를 들면 Fig. 3(a)에 표시한 것과 같은 내부결함에 대해서는 내부결함을 내포하는 판의 자유표면에 평행한 사각형을 그리고, 이 사각형에 내접하는 타원 결함으로 치환한다. 이 결함의 근방에 다른 결함이 존재하면 상호 영향 때문에 이들의 복합효과를 고려할 것

인가 아닌가를 판별하여야 한다. 단독으로 존재하는 경우보다 상호영향 때문에 응력확대계수 K값이 약 20%이상 증가하는 경우는 단독의 결함으로는 취급하지 않고 전체의 결함을 포함하여 이것들을 내포하는 사각형의 내접타원결함으로 치환하도록 하고 있다(Fig. 4).

또한, 이 단순화된 결함이 자유표면근방에 있는 경우는 Fig. 3(b)와 같이 표면 반타원 결함으로 치환한다.

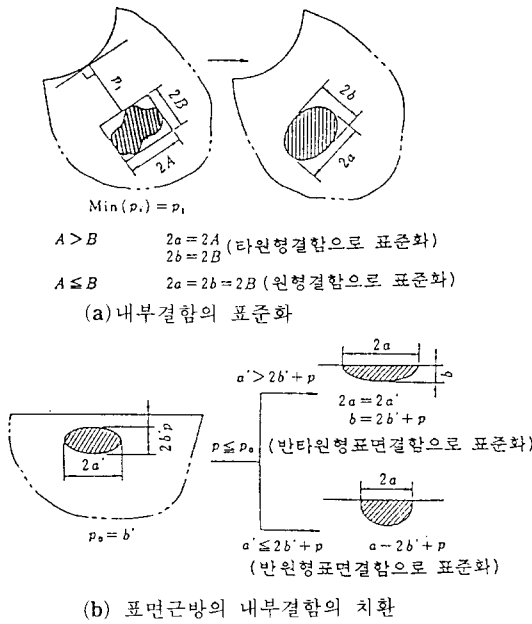


Fig. 3 결함의 표준화 예

이상의 표준화 과정에서 타원결함 또는 반타원 결함의 장축이 판두께 방향이 되는 경우는 장축과 같은 크기로 단축의 크기를 치환하여 원형 또는 표면 반원형 결함으로 치환한다.

피로균열의 성장과정에서는 초기 결함이 복잡한 기하학적 형상을 하고 있을지라도 균열둘레가 오목한부분이 주위보다 K값이 크게되어 그곳에서 선택적으로 피로균열이 진전하여 최종적으로는 거의 (반)타원형상으로 되어 진전한다는 점과, 길이 방향으로 편평한 균열은 길이 방향만 진전하여 원형에 가깝게 된 후 길이 방향으로도 진전한다는 것이 실험적 사실에 의하여 알려져 있으므로 상기와 같은 표준화 수법을 취하고 있다. 또 판두께의 1/2이상의 길이의 결함은 관통결함으

로 치환하고 있다.

반복하중을 받는 경우는 피로균열 전파계산을 행하고 그 확대된 결함에 대하여 결함특성치수  $\bar{a}$ (등가치수라고도 한다)을 구한다. 관통결함에 대해서는  $a = \bar{a}$ , 비관통결함의 경우는 Fig. 5 또는 Fig. 6로부터  $\bar{a}$ 를 구한다. 이 결함특성치수는 결함의 전방에서의 K값의 최대치와 같은 K값이 되는 관통결함의 길이 1/2로서 정의되는 것으로 Fig. 5 및 Fig. 6은 균일인장응력이 작용하는 경우의 비관통(반)타원균열에 대하여 Newman 등에 의한 K해석결과를 기초로 하여 작성된 것이다.

### 3.2. 피로하중에 의한 결함의 확대효과

반복하중을 받는 구조에서는 피로균열전파 계산을 실시하여 피로에 의하여 확대된 결함치수를 구한다.

이때 피로전파 특성은 다음과 같은 Paris식에 따른다고 가정한다.

$$da/dN = C (\Delta K)^m \tag{1}$$

C와 m사이에는 다음 관계가 성립하는 것으로 한다.

$$C = 5.53 \times 10^{-5} (55)^{-m}$$

여기서,  $\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi a}$ 라 두면

초기 결함(균열)  $a_0$ 가 응력  $\Delta \sigma$ 의 반복하중을 N회 받은 후의 균열  $a_N$ 는 Paris식을 적분하면 다음과 같이 된다.

$$\int_{a_0}^{a_N} (\sqrt{\pi a})^{-m} da = C \int_0^N \Delta \sigma^m dN \tag{2}$$

으로부터  $a_N$ 는

$$a_N = [a_0^{(2-m)/2} + ((2-m)/2) \{C \pi^{m/2} \Delta \sigma^m N\}^{-((2-m)/2)}] \tag{3}$$

가 된다.

여기서,  $C = 5.53 \times 10^{-12}$

$$m = 4$$

라 두면, 다음과 같이  $a_N$ 을 구할 수 있다.

$$a_N = \frac{a_0}{1 - 5.5 \times 10^{-12} (\Delta \sigma_{eff} / \sqrt{\pi a_0})^4 (N/a_0)} \tag{4}$$

이 식을 기본으로 하여 각종결함에 대하여 다음과 같이 계산한다.

(1) 판두께 관통결함.

$$a_N = \frac{a_0}{1 - 5.5 \times 10^{-12} (\Delta \sigma_{eff} / \sqrt{\pi a_0})^4 \times (N/a_0)} \tag{5}$$

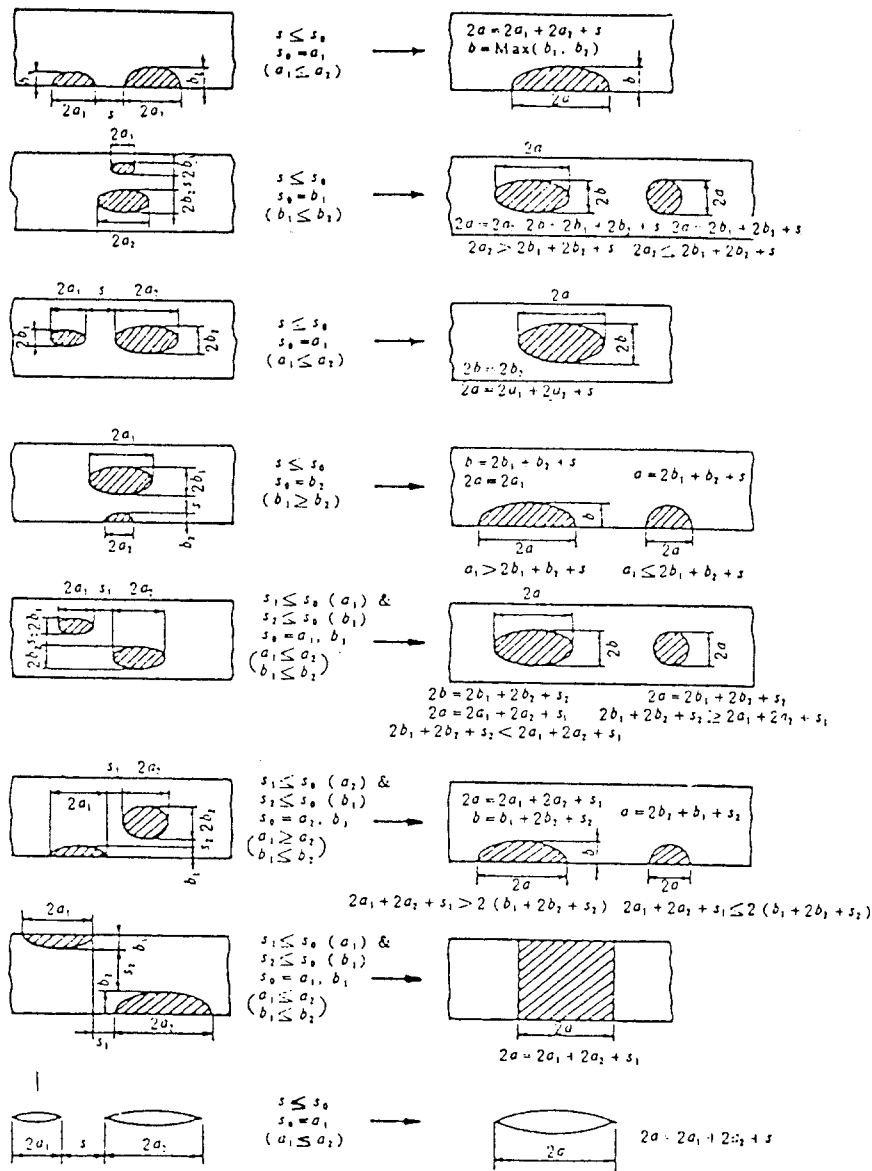


Fig. 4 인접결합의 복합

$$\Delta\sigma_{eff} = \Delta\sigma_t + 0.5\Delta\sigma_b \quad (6)$$

$a_0$  : N=0일때의 결합의 판표면에서의 길이의 1/2(mm)

$a_N$  : N회 반복후에 최대된 결합길이의 1/2(mm)

N : 응력의 반복수

$\sigma_t$  : 인장응력 (kgf/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_b$  : 면외굽힘응력 (kgf/mm<sup>2</sup>)

$\Delta\sigma_{eff}$  : 유효응력변동폭 (kgf/mm<sup>2</sup>)

(2) 내부결합

$$b_N = \frac{b_0}{\sqrt{1 - 5.5 \times 10^{-12} (\Delta\sigma_{eff} \sqrt{\pi b_0})^4 \times (N/b_0)}} \quad (7)$$

$$\Delta\sigma_{eff} = \Delta\sigma_t + 0.25\Delta\sigma_b \quad (8)$$

$b_0$  : N=0일때의 결합의 판두께 방향의 길이의 1/2(mm)

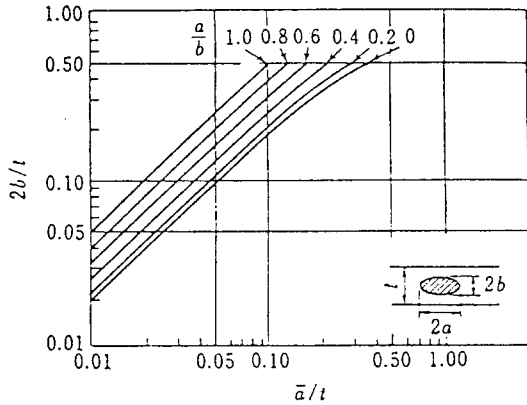


Fig. 5 내부결합의 등가치수  $\bar{a}$

$b_N$ : N회 반복후에 확대한 판두께 방향의 길이의 1/2(mm)  
 $b$  =  $b_N$ 에 대응하는 판폭방향의 결합길이의 1/2값  
 $a_N$ 는 다음과 같이 구한다.

$$a_N = a_0 \left(1 + \frac{b_N^3 - b_0^3}{a_0}\right)^{1/2} \quad (9)$$

(3) 표면결합

$$a_N = \frac{a_0}{1 - 5.5 \times 10^{-12} (\Delta\sigma_{eff} \sqrt{\pi a_0})^4 \times (N/a_0)} \quad (10)$$

$$\Delta\sigma_{eff} = \Delta\sigma_t + \Delta\sigma_b \quad (11)$$

$a_0$ : N=0일때의 결합의 판표면에서의 길이의 1/2(mm)

$a_N$ : N회 반복후에 확대된 판표면에서의 길이의 1/2(mm)

$a_N$ 에 대응하는 N회 반복후의 확대된 결합의 깊이  $b_N$ 는

$$b_N = \frac{a_0}{(1/a_N) + (0.06 + 0.94R_b)/t} \quad (12)$$

$$R_b = \frac{\Delta\sigma_b}{\Delta\sigma_t + \Delta\sigma_b}$$

이상의 순서에 의하여 구한 확대된 결합의 치수를 이용하여 3.1의 방법에 따라 피로효과가 고려된 결합의 표준화를 실시한다.

### 3.3 파괴파라미터 $\delta$ 의 역학적 추정

이상에서 언급한 순서에 따라 구한 등가결합 길이  $\bar{a}$ 를 이용하여 파괴파라미터  $\delta$ (균열선단의 개구변위, COD)를 다음식에 의하여 구한다.

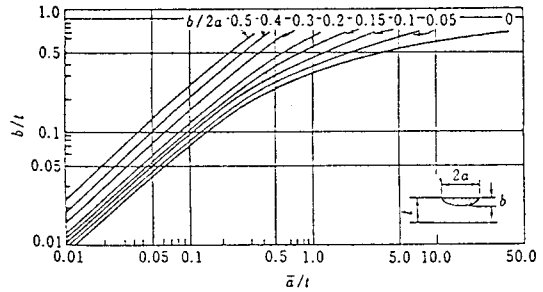


Fig. 6 표면결합의 등가치수  $\bar{a}$

$$\delta = 3.5e \cdot \bar{a} \quad (13)$$

단,  $e$ : 결합에 작용하는 변형률

COD 설계곡선은 작용하는 변형률이 작은 경우와 큰 경우의 2 경우로 나누어서 생각하고 있지만 WES-2805에서는 간단하게 하기 위하여 안전측의 값인 식 (13)과 같은 매우 단순한 형태로 COD 설계곡선을 제시하고 있다. 또한 작용변형률은 다음식으로 주어진다.

$$e = e_1 + e_2 + e_3 \quad (14)$$

여기서,

$e_1$ : 경계력에 의한 구조부재에 생기는 공칭등가인장막변형률.

$e_2$ : 용접잔류응력에 대응하는 변형률.

$e_3$ : 이음형상의 불연속에 의하여 증가하는 변형률.

또  $e_1, e_2, e_3$ 에 대해서는 각각 안전측의 평가가 되도록 다음과 같이 계산하고 있다.

$e_1$ 에 대해서는 공칭인장막응력  $\sigma_t$ 와 면외굽힘응력  $\sigma_b$ 로부터 다음과 같이 계산하고,  $\alpha_b$ 는 결합의 종류에 따라 Table 1과 같이 정한다.

$$e_1 = \sigma_t/E + \alpha_b (\sigma_b/E) \quad (15)$$

단,  $E$ : Young's modulus

Table 1  $\alpha_b$

결 합 종 류		$\alpha_b$
관 통 결 합		0.25
내 부 결 합		0.25
표 면 결 합	결합이 인장력측에 있는 경우	0.25
	결합이 압축력측에 있는 경우	0

또, 용접잔류응력에 대응하는 변형률  $e_2$ 는 강판의 규격항복응력  $\sigma_y$ 로부터 구하는 항복변형률  $\epsilon_y (= \sigma_y/E)$ 을 채용하여

$$e_2 = \alpha_y \epsilon_y \quad (16)$$

Table 2  $\alpha_r$

결함의 종류	맞 대 기 이 음		필 렛 이 음	
	용접선에 평행한 결함	용접선에 수직한 결함	용접선에 평행한 결함	용접선에 수직한 결함
관통결함	0	0.6	0	0.6
내부결함	0	0.6	0	0.6
표면결함	0.2	0.6	0.6	0.6

로 하고,  $\alpha_r$ 는 결함의 종류와 그 위치 관계에서 Table 2와 같다.

또한, 이음형상이 불연속에 의한 집중 변형률이 생기는 경우 변형률집중계수를  $K_t$ 로 하고 (Table 3 참조)  $e_3$ 를 다음식으로 산정하고, 그 총합을  $e_3$ 로 한다.

$$e_3 = (K_t - 1)e_1$$

이상과 같이하여 구하여진 파괴파라미터  $\delta$ 가 최저 사용온도에서의 결함부에 대한 파괴 인성치  $\delta_c$ (한계 CTOD치)보다 적으면 그 결함은 허용된다고 판정된다.

재료의 파괴인성치  $\delta_c$ 는 3점굽힘시험결과를 채용하도록 하고 있지만 환산된 온도에서 실시한 샤르피 충격시험에 의한 흡수에너지를 이용해서도 평가할 수 있도록 하고 있다.

#### 4. 평가방법의 문제점

지금까지의 기준은 평가순서를 실무적 간편성에 중점을 두고 있으며 오직 결정론적 입장에서 대담하게 단순화시켜서 파괴역학을 적용시키고 있기 때문에 파괴현상과 외력등의 확률적 성질 또는 파괴역학적 지식의 불비에 의한 불확실성, 평가순서의 간단화·단순화에 따른 불확실성 등의 여러가지 불확실요인은 대개 주관적 판단에 의한 안전치를 고려하고 있다고 할 수 있다.

결함을 허용할 것인가 아닌가 하는 최적인 판단의 양부는 결함평가 순서의 각 단계에서의 판단의 신뢰도에 의한다고 할 수 있으며 결함평가 과정에 개입하게 되는 불확실 요인에 대한 배려가 있어야 할 것이며, 확률론적 분석에 의한 신뢰성 공학의 개념을 도입한 판단기준이 연구될 필요가 있다.

평가순서에 개입된 불확실요인을 각 단계별로 열거하면 다음과 같다.

#### (1) 비파괴검사

- 1) 기기의 결함 검출능력에 의한 불확실도.
- 2) 검사 실시 영역의 선택에 따른 불확실도.
- 3) 조작자의 자질, 판단능력의 차에 의한 불확실도.

#### (2) 결함형상의 단순화.

- 1) 불규칙 형상의 규칙화에 따른 불확실도.
- 2) 평가방향의 투영에 따른 불확실도.
- 3) 자유경계의 영향에 따른 불확실도.
- 4) 근접결함의 복합에 따른 불확실도.

#### (3) 작용응력-변형률과 그 설정.

- 1) 응력해석의 불비에 의한 불확실도.
- 2) 외력의 확률적 성질에 의한 불확실도.
- 3) 응력-변형률의 표준화에 따른 불확실도.

#### (4) 피로균열 진전해석

- 1) 전과 평가식의 불비에 의한 불확실도.
- 2) 재료의 피로균열 진전 특성의 불확실성에 의한 불확실도.

#### (5) 균열 파라미터의 산정.

- 1) 등가 결함치수의 결정에 따른 불확실도.
- 2) 균열 파라미터 산정식의 불비에 따른 불확실도.

#### (6) 파괴인성치의 결정.

- 1) 파괴인성치 화산식의 불비에 의한 불확실도.
- 2) 파괴인성치의 확률적 성질에 의한 불확실도.


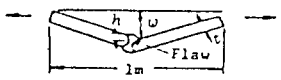
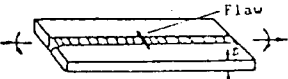
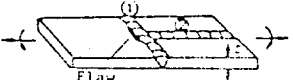
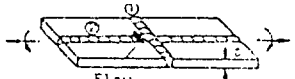
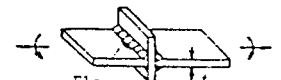
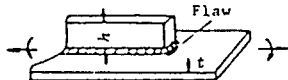
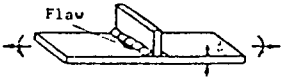
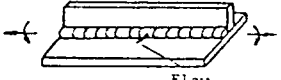
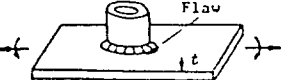
#### (7) 판정.

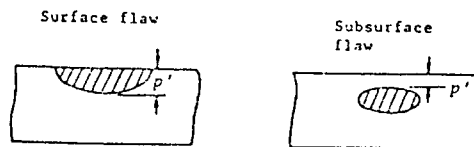
- 1) 파괴 조건식의 불확실도.

### 5. 결 언

용접부에는 초기결함 및 사용중에 발생하는 균열이 존재하는 것을 피할 수 없으며, 이들은 제작과정 또는 사용중에 비파괴검사용에 의하여 비교적 정도높게 측정할 수 있다. 따라서 이들 결함이 사용중 또는 다음 검사기간까지 어떻게 거동할 것인가를 정확히 규명하여 보수, 치환 또는 계속사용 여부를 결정하여야 한

Table 3 각종 비관통 균열의  $K_t$ 에

Joint type	Profile	$k_t$	Remarks	
Butt welding		1.5, when $p' \leq 0.15t$ 1, when $p' > 0.15t$	Let $k_t=1$ for flaw in welded joint without reinforcement of weld	
		$1 + \frac{3(w+h)}{t}$ when $p' \leq 0.5t$ $1 + \frac{3(w+h)}{2t}$ when $p' > 0.5t$	Let $k_t=1$ for surface flaw in convex side	
		1	Take welding residual stress into account	
		Same as butt joint	To be regard as transverse butt joint when weld is laid from ② to ①	
				
Fillet welding	Load to be shared		3, when $p' \leq 0.1t$ 2, when $p' > 0.1t$	Same as butt joint when full penetration is employed
			3, when $h \geq t$ 2, when $h < t$	Take welding residual stress into account
	No load to be shared		1.5, when $p' \leq 0.1t$ 1, when $p' > 0.1t$	
			1	Take welding residual stress into account
			1.5, when $p' < 0.1t$ 1, when $p' > 0.1t$	



다. 이와같은 결함평가의 정도를 높이기 위해서는 실 구조물의 손상사례에 대한 많은 자료가 축적되어야 할 것이며 이들의 신뢰성을 높게 평가할 수 있는 평가기술이 개발되어야 할 것이다.

#### 참고문헌

- 1) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. X I, ASME, 1986.
- 2) German standard: Quality assurance of welding operations (DIN-8563), 1978.
- 3) 日本溶接協會規格：溶接継手のぜい性, 破壊發生に對する缺陷の評價方法 (WES-2805), 日本溶接協會, 1980.
- 4) 小林英男：溶接構造物の非破壊評價, 溶接技術, Vol. 35, No. 10, 1987.
- 5) 成田：溶接缺陷の許容限界, 溶接技術 Vol. 35, No. 10, 1987.
- 6) 日本溶接學會：溶接・接合便覽, 丸善株式會社, 1990.