

# 피로 파괴 제어기술의 현황과 전망

이 호 섭  
〈해사기술연구소 부장〉

## 1. 서 언

구조물이 계획된 수명동안 주어진 기능과 성능을 유지하기 위해서는 작용하는 하중으로부터 심각한 손상이 발생되지 않도록 구조적인 안전성을 확보하는 문제가 가장 중요하게 고려되어야 할 것이다. 특히 최근에는 경제성 추구에 따른 구조최소화, 경량화가 진전되는 반면 구조물의 대형화, 고강도화 등의 요인에 의해 사용조건은 점차 가혹해지고 경향이 있기 때문에 손상에 대한 안전성을 정확히 평가해야 할 필요성은 더욱 증대되고 있다.

구조물의 손상은 부재의 소성대변형, 좌굴 등에 기인하는 붕괴현상 뿐만 아니라 구조재료의 금속취성파괴, 피로균열의 전파에 의한 파단 등이 그 원인이 될 수 있다. 전자의 경우 종래의 재료역학적 접근방법에 따라 구조안전성을 평가할 수 있으나 후자의 문제는 재료의 파괴인성치와 균열주위의 asymptotic 한 응력분포에 주요인점을 둔 “파괴역학”의 개념을 도입함으로써 접근 가능하다. 이미 항공기의 동체 및 엔진, 각종 기계부품들의 설계시에는 이러한 파괴역학적 구조안전성평가 방법이 폭넓게 적용되고 있다.

본고에서는 이 파괴역학에 바탕을 둔 피로강도 평가분야의 연구동향을 역사적 배경, 이론의 개요, 실제 구조물에서의 적용 방법, 앞으로의 전망 등을 중심으로 개괄적으로 살펴보고자 한다. 먼저 산업혁명 이후 역사적 자료로 남아 있는 대표적인 대형파손사고의 예를 몇가지 열거하면 다음과 같다.[1][8]

(1) 1860-1870년 사이 영국에서는 매년 200명에

가까운 사람들이 철도사고(열차륜, 차축, 철로등의 파괴)로 인하여 희생되었다는 통계가 있으며 그외 원인을 명확히 알 수 없는 각종 구조물의 붕괴사고들이 다수 보고된 바 있다.

1830년 3월 19일 영국의 Montrose 의 현수교 위에서 약 700명의 인파가 모여 보트경주를 참관하고 있었다. 이때 다리의 중량을 지지하던 chain 하나가 끊어지면서 많은 인명피해가 발생하였다.

(2) 1866년 1월 22일 Manchester 정류장 지붕의 일부가 붕괴되어 2명이 희생되었다.

(3) 1866년경 영국에서는 매년 50-60건의 보일러 폭발사고가 발생하여 막대한 인명과 재산손실이 보고되고 있다.

이와같은 사고들은 부분적으로 열악한 구조설계의 탓도 있지만 대부분 재료의 내부에 이미 존재하는 결함들로부터 균열이 진전됨으로써 최종적으로 파단에 이른다는 사실이 점차 밝혀지게 되었다. 20세기에 들어서면서 기존에 사용되던 철(iron)에 비하여 파괴인성이 뛰어난 강(steel)이 구조용 재료로서 널리 보급됨에 따라 이러한 파손사고는 극적으로 줄어들게 되었다. 그러나 생산의 효율성과 경제성 제고를 위하여 전 용접에 의한 구조물의 건조방식이 도입되면서 이러한 대형사고의 위험은 다시 급격히 증대된다.

(4) 1939-1945년 제2차 세계대전 기간중 미국에서 건조된 약 5,000척의 Liberty 형 전용집선 중 약1,000척에서 심각한 손상이 발생되

었고 10척은 조용한 해상에서 갑자기 두동강이 나는 등 20여척이 완전히 물로 분리되는 파손이 발생하여 폐기되었다.

- (6) 1944년 미국 Schenectady 에서 수소저장용 구형탱크가 사용 3개월만에 파괴되었으며 Cleveland 에서는 LNG 저장탱크가 폭발하여 128명이 사망하고 680만 달러의 재산손해가 발생하였다.
- (7) 1954년 세계최초의 여객기인 Comet 기가 시험비행 4일만에 25만개의 파편으로 파괴되었다. 항복응력의 1/3이하가 되도록 설계하였으나 객실창문 모서리에 수많은 균열들이 관찰되었다.
- (8) 1950년대 이후 원자력 발전설비, 우주 Rocket, 항공기 등이 항복응력보다 현저히 낮은 응력하에서 파손되는 사고가 다수 보고되고 있다.

당시, 강판 등 재료의 파괴인성치는 오늘날의 그것에 비하여 매우 낮은 수준이었고 용접기술 또한 초보적인 단계에 불과하였다. 따라서 대부분의 손상은 용접부 등에 존재하는 고지 응력집중부로부터 발생한 균열에 의한 취성파괴가 주원인인 것으로 밝혀지고 있다.

## 2. 재료의 파괴와 파괴역학

### 2.1 재료의 파괴기구

재료의 파괴는 제조과정에서 이미 발생한 초기 균열 혹은 사용중에 발생한 미소균열이 외하중 또는 환경에 의해 어느정도 크기까지 성장하게되면 갑자기 급속파단으로 이어지는 경우가 대부분이다. 일반적으로 금속재료의 파괴현상은 다음과 같이 크게 4가지로 분류할 수 있다. [2]

#### (1) 벽개파괴(cleavage fracture)

금속원자결합의 파괴로 인하여 특정 결정면을 따라 직접적으로 분리되는 파괴를 말한다. 결정재료에서 가장 취성을 보이는 파괴형태로서 거의 소성변형을 동반하지 않기 때문에 파괴에 소요되는 에너지가 적다.

#### (2) 연성파괴(ductile fracture)

취성파괴에 대응되는 개념으로서 파단시 큰 소

성변형을 동반한다. 전단변형에 의한 파단이 그 특징이며 파면에 미끄러짐 흔적인 물결무늬(nipple) 또는 미소공동의 합체현상 때문인 것으로 추측되는 움푹패인 자국(dimple) 등이 관찰된다.

#### (3) 피로파괴(fatigue fracture)

재료가 반복응력을 받게되면 내부에 미소균열이 발생되며 (crack initiation) 이 균열이 반복적으로 열고 닫히는 과정에서 조금씩 진전됨으로써 (crack propagation) 결국 파단에 이르게 된다. 소성변형을 거의 동반하지 않으며 파면에 응력의 크기 또는 진동주기의 변화에 따른 균열직전 속도의 불규칙성에 의해 발생하는 특징적인 물결무늬(striation, beach mark)가 관찰된다.

#### (4) 환경파괴(environment assisted cracking)

화학적 환경이 재료의 연성을 저하(취성화)를 초래함으로써 파괴에 이르는 경우를 말한다. 응력부식, 수소취화, 부식피로 등에 의한 파괴가 이 범주에 속한다.

### 2.2 파괴역학의 성립과정

상기 (2)항의 연성파괴를 제외하고는 모두 균열의 생성 및 진전에 의하여 재료가 파괴된다는 사실을 알 수 있다. 본질에서는 균열이 존재하는 구조부재의 강도를 평가하는 학문인 이른바 “파괴역학”의 발전과정을 개략적으로 서술하였으며 일반적으로 구조강도평가에 적용되는 재료역학과의 특징적인 차이점들을 Table 1에 정리하였다.

#### (1) Griffith의 성취이론(1921)(1924)

유리와 같은 완전취성재료에 균열이 존재하는 경우의 파괴조건을 기술하고 있다. (안정론적파괴론). 파괴역학 분야의 가장 선구적이며 기초적인 이론으로 평가된다.

#### (2) Westergaard(1939) Muskhelishvili(1953)

복소응력함수를 도입하여 균열선단 부근의 응력장을 해석하였다. 이 연구결과는 이후 응력확대계수의 이론해를 구하는데 매우 유용한 수단이 된다.

#### (3) Irwin(1948), Orowan(1955)

균열선단부근의 소성변형 효과를 고려하여 Griffith의 이론을 수정함으로써 강과 같은 금속에 적용할 수 있도록 개선하였다.

(4) Irwin(1958)

균열선단 부근의 탄성응력 및 변위분포를 응력 확대계수(stress intensity factor) 라는 단일 parameter로 표현함으로써 선형파괴역학(LEFM, linear elastic fracture mechanics)이론을 제창하였다. 응력확대 계수 K는 취성파괴, 피로파괴 등과 같이 균열선단 부근에 발생하는 소성역의 범위가 충분히 작은 경우(Small Scale yielding)의 파괴조건 기술에 적합하며 현재도 가장 보편적으로 사용되고 있는 파괴 parameter이다.

(5) Paris등(1961)

피로균열의 진전속도를 응력확대계수의 함수를 표현한 실험식 (m승 법칙)을 발표하였다.

(6) Rise(1968)

균열선단 부근에 전면항복이 발생하는 연성과 파괴인성치가 큰 재료를 다루기 위하여 비선형 파괴 parameter인 J적분을 제안하였다.

(7) Wells(1961)

균열선단의 개구변위(CTOD : crack tip opening displacement)가 어떤 한계치에 이르면 불안정 파괴로 이어진다는 가설을 발표하였다. K(소규모 항복)와 J적분(전면항복)의 중간 즉, 대규모 항복이 발생하는 범위의 파괴조건으로 이용되고 있다.

2.3 재료의 파괴 인성치

균열이 성장하여 어떤 일정한 크기에 이르면 갑자기 급속한 파단으로 이루어진다. 이러한 불안정

취성파괴에 대한 재료고유의 저항력을 파괴 인성치라고 하는데 파단 직전의 파괴 parameter로써 표시한다. 선형파괴역학에서는 한계응력확대계수 (critical stress intensity factor)  $K_C$ , 비선형파괴역학에서는 한계 COTD  $\delta_C$  또는 J-적분의 한계치인  $J_C$ 를 이용한다.

재료의 파괴인성에 영향을 주는 인자로는 재질 및 용접법, 판두께, 온도(천이온도), 노치의 형상 및 상태, 하중속도(변형속도) 등을 들수 있다. 재료의 파괴인성치를 평가하기 위해서는 실험에 의존할 수 밖에 없으며 이러한 실험의 목적은 다음과 같이 크게 2가지 범주로 나눌 수 있다.

(1) 비교실험

재료의 인성치를 다른재료와 상대적으로 비교하기 위한 실험이며 설계시의 재료선택, 품질관리 등에 적용된다. Charpy충격시험, 아이조드 충격 시험이 전형적인 예이며 그의 tear test, notch tensile test, 용접 bead의 굽힘시험 등이 있다.

(2)특성실험

구조물에 불안정 취성파괴가 발생하는 것을 방지하기 위하여 어떤 특정한 조건하에서의 파괴인성치를 정량적으로 얻기위한 실험이다. 직접적으로 재료의 파괴역학적 파괴인성치( $K_C, J_C, \delta_C$  치 등)를 얻기 위해서는 ASTM규격에 의한 표준시험으로 3점 굽힘시험편, CTS(compact tensile specimen)을 이용한 시험법이 널리 사용되고 있고, 균열의 발생 및 전파특성을 구명하기 위한 실험으로는 deep notch test, drop weight test, explosion bulge test, double tension test 등이 있다. 실제 구조물에서 발생하는 응력상태, 환경등을 현실적으로 고려하기 위해서는 노치를 가진 용접부의 광폭인장시험, 압력용기의 압력상승에 의한 파괴시험 등의 구조모형실험이 이용된다.

2.4 선형파괴역학

고체 내부에 존재하는 균열의 변형은 opening mode(mode I), sliding mode(mode II), tearing mode(mode III)등 3가지의 기본적인 변형양식으로 표현가능한데 공학적으로는 mode I이 가장 중요하게 고려된다. 만일 균열의 선단부근에

Table 1. Fracture Mechanics and Strength of Material

	Strength of Material	Fracture Mechanics
Objective	assessment of global structural behavior and stress level	assessment of local behavior around crack tip
Strength assessment parameter	◆ stress $\sigma$ ◆ displacement u	◆ stress intensity factor K ◆ J-integral J ◆ CTOD $\delta$
Material strength criteria	◆ tensile strength $\sigma_u$ ◆ yield stress $\sigma_y$	◆ fracture toughness $K_C$ $J_C$ $\delta_C$

발생되는 소성역의 크기가 부재의 다른 치수에 비하여 충분히 작다면 이 소성역의 존재가 균열주위의 탄성응력장 또는 변위장에 별 영향을 주지 않는 것으로 간주할 수 있고 따라서 선형탄성해석만으로도 상당히 정확한 해를 제공할 수 있을 것이다. 이러한 가정 하에서 각 변형양식에 대하여 균열주위의 응력 및 변위의 선형탄성해를 구해보면 외하중의 크기에 비례하며 균열을 포함하는 구조물의 형상에 따라 달라지는 상수 K와 위치(좌표)의 함수  $f(r, \theta)$ 의 곱으로 표현된다는 사실을 확인할 수 있다. 따라서 균열의 선단부근의 응력장 및 변위장이 단 하나의 parameter K만으로 asymptotic하게 표현가능하며 이 상수 K를 응력 확대계수(stress intensity factor)라고 한다. 결국 균열을 가진 구조물의 파괴조건은 응력확대계수 K를 실험적으로 결정되는 재료특성치  $K_C$ 와 단 순비교함으로써 쉽게 표현할 수 있다.

균열선단에서 응력의 크기가 무한대가 되는 특이점(singularity)이 존재하기 때문에 그다지 간단하지는 않으나 Airy의 응력함수 또는 Wetergaard, Muskhelishvili의 복소응력함수를 이용한 고전적인 탄성해석법 만으로도 대부분의 단순한 형상의 균열에 대한 응력확대계수는 유도할 수 있다. 그러나 기하학적 형상을 수학적으로 표현하기 어려운 복잡한 구조물에서는 FEM과 같은 수치적 해석법을 이용해야 한다

최근에는 파괴인성치가 상당히 높은 재료들이 구조재로 많이 사용되고 있기 때문에 이러한 선형 파괴역학적 접근방법 만으로 정확한 파괴기준을 제공하는 것은 어렵다. 그러나 J-적분, CTOD 등 비선형 파괴역학이론은 설계문제에 직접 적용하기에는 너무 복잡할 뿐만 아니라 비용이 많이 드는 문제점이 있다. 또한 취성파괴나 작용응력의 크기가 비교적 작은 피로균열전파 문제에 있어서는 균열 선단에서만 소규모항복이 발생된다는 선형파괴역학의 기본가정이 대체로 만족되며, 실제 사용되는 판 두께에 대한 광폭 균열전파 실험결과에 따르면 선형파괴역학적 접근방법이 안전측의 결과를 주는 것으로 판명되고 있기 때문에 실제 통상의 구조설계시에는 이에 따라 강도검토가 이루어지고 있다.

### 3. 구조물의 피로강도 평가

재료가 장시간 반복적인 응력을 받게되면 1회 하중에서의 파괴 응력보다 훨씬 낮은 응력상태 하에서도 파괴가 발생할 수 있다. 이러한 파괴를 피로파괴라고 하며 일반적으로 자동차, 항공기, 선박 등 반복하중에 장기간 노출되는 구조물에서 흔히 관찰되고 있다. 피로파괴는 낮은 응력수준에서 사전 조짐없이 갑작스럽게 불안정 취성파괴로 이어지기 때문에 구조물에 심각한 손상을 가져오는 경우가 많다. 일반적으로 피로강도의 평가과정은 다음과 같은 2단계로 구분할 수 있다.

첫 단계는 피로균열이 발생할 때까지의 수명을 평가하는 과정이며 흔히 S-N approach를 이용한다. 두번째 단계에서는 이렇게 발생된 균열 또는 초기부터 존재하던 균열의 진전과정을 예측하여 구조물의 잔존수명 또는 다음 검사시간까지 불안정 취성파괴로 이어질 가능성 등을 검토한다.

#### 3.1 피로균열 발생수명 해석

##### (1) S-N 선도

Fig. 1은 전형적인 S-N선도를 보여주고 있다. 작용응력의 크기와 파괴가 발생할 때까지의 응력 작용 회수(cycle수)를 대수좌표계에서 대비하고 있는데, 이와같은 양대수 좌표계에서 거의 직선적인 분포를 보이고 있다. 응력이 작아질수록 파괴에 이르는 cycle수가 지수적으로 증가하게 되며 어떤 한계이하로 응력을 감소시키게 되면 아무리 cycle수가 많더라도 파괴가 일어나지 않는다. 이 응력한계를 피로한도라고 한다. 그러나 대부분의

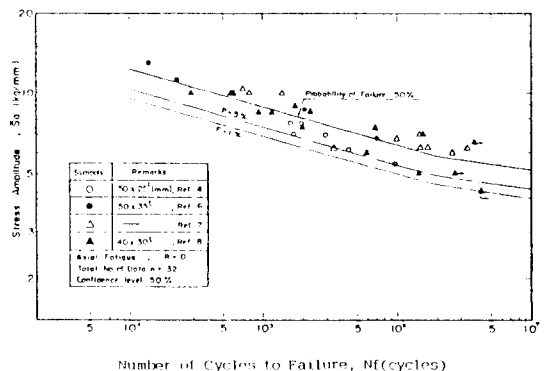


Fig. 1 S-N curves of Al 5083-O alloy 17

비철합금에서 보는 바와 같이 피로한도를 보이지 않는 경우도 많다.

일반적으로 피로강도는 응력진폭 뿐 만 아니라 평균응력의 크기에 따라 달라진다. 현재까지 발표되고 있는 대부분의 S-N선도들은 평균응력이 zero인상태(응력비  $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = -1$ )를 기준하고 있으나 현실적으로는 평균응력이 zero인 완전양진의 경우가 드물기 때문에 이 S-N선도를 이용하되 평균응력의 효과를 고려하여 가상응력진폭을 결정하는 여러가지 변환방법들이 발표되고 있다.[3]

S-N곡선을 구하기 위한 피로시험방법에 대해서는 특별히 통일된 기준이 없다. 그러나 대체로 파괴확률 50%의 균열발생시점을 기준으로 하고 있으며 단순인장 혹은 굽힘 응력 상태에서 실험한다. 완전양진 응력상태( $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = -1$ )가 표준이 되지만 응력비R 값을 변화시킨 실험결과가 이용될 수도 있다. 실제 재료가 거동하는 설계온도에서 실험하는 것이 원칙이나 더 안전측의 결과를 이용할 수 있다.

(2) 누적피해도 법칙

실제 대부분의 대형구조물은 불규칙적인 외하중하에서 거동하기 때문에 작용응력 또한 불규칙적이다. 이러한 경우에는 S-N곡선을 그대로 적용하기는 어렵기 때문에 palmgren-Miner가설에 의한 선형피해도 법칙을 적용하여 피로파괴 발생수명을 예측한다.

대부분의 구조설계 code에서는 다음과 같이 누적피해도 D를 정해진 값 $C_w$ 이하가 되도록 규정함으로써 피로강도에 대한 기준을 제시하고 있다.

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \leq C_w$$

여기서

$N_i$  = 변동 응력 진폭  $S_i$ 일때 S-N곡선에서 구한 파괴까지의 cycle수  
 $n_i$  = 작용응력의 빈도분포로부터 추정된 실제 작용응력의 반복 cycle 수

(3) 응력집중 계수

해양구조물의 T,K-joint와 같이 기하학적으로 불연속적인 구조부재의 피로강도를 검토할 경우

에는 다음의 두가지 방법이 적용될 수 있다.

- i) 같은 형상의 모형에 대한 실험을 통하여 S-N 선도를 얻는다. 합리적이지만 경비가 많이 소요되므로 모든 경우에 적용하기는 어렵다.
- ii) 모재 또는 용접부의 시편에 대한 S-N선도를 사용하되 그 부분의 응력집중계수는 정밀하게 구한 다음 이 값을 곱하여 얻은 peak응력으로써 변동응력진폭을 결정한다. 대부분의 경우 이 방법을 이용한다.

3.2 균열전파 해석

앞에서 설명한 피로발생 수명해석을 통하여 구조물에서 피로균열의 발생가능성을 검토하여 대비할 수 있다. 그러나 혹시 피로균열이 발생되는 경우 또는 검사과정에서 미처 발견되지 못한 초기 결함(초기균열)이 이미 존재하는 경우에는 이 미소균열의 진전에 의하여 뜻하지 않는 사고 또는 구조물에 치명적 손상이 발생할 우려가 있으므로 이러한 초기균열의 진전이 강도기준상 허용치 이내로 제한될 수 있을 것 인지를 검증할 필요가 있다. 따라서 일정한 형상 및 크기의 초기균열을 가정한 다음 파괴역학적 접근방법에 따라 균열의 진전과정을 추정한다. [4]

(1) 균열진전속도

피로균열의 전파문제는 다음과 같은 paris-Erdogan식에 의해 주어지는 균열진전속도를 적분함으로써 해석할 수 있다.

$$\frac{da}{dN} \text{ or } \frac{db}{dN} = C(\Delta K)^m \text{ for } \Delta K > \Delta K_{th}$$

$$= 0 \quad \text{for } \Delta K \leq \Delta K_{th}$$

여기서,

a,b=균열의 크기

N=응력의 반복작용 회수

$\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ , 응력확대계수 K의 변동치

C, m=실험에 의해 결정되는 재료상수.

$\Delta K_{th} = \Delta K$ -threshold치

윗식은 평균응력이 zero인 상태를 기준으로 한 식이기 때문에 평균응력이 zero가 아닌 일반적인 조건에서는 그대로 적용하기 어렵다. 따라서 S-N

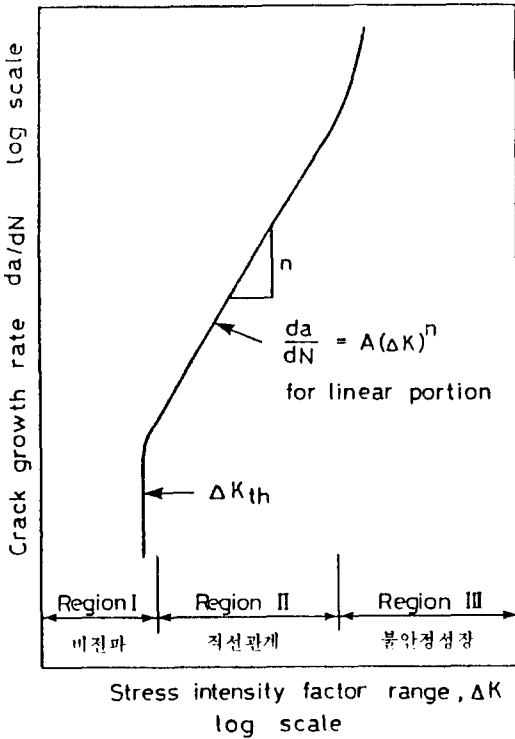


Fig. 2 Relation between Fatigue Crack Propagation and Stress Intensity Factor

approach 에서와 마찬가지로 평균응력을 고려할 수 있는 균열전파식이 forman, Tall, Robert and Erdogan, Toyosada 등 여러 연구자들에 의해 제안되고 있다.[5]

### (2) K-threshold

앞서 밝힌 바와 같이 균열이 성장하여 응력확대계수  $K$ 가 한계응력확대계수  $K_C$ 에 이르게 되면 상기 식들로부터 표현되는 안전성장에서 불안정하고 급격한 균열진전으로 이행된다. 또한  $K$ 의 변동치  $\Delta K$ 가 작으면 Fig.2에서 보는 바와 같이 균열은 더이상 성장하지 않는다. 즉 응력확대계수의 변동치가  $\Delta K$ -threshold ( $\Delta K_{th}$ )에 이르러야만 비로소 균열이 진전되기 시작하는데 이값은 재료에 따라 달라지며 응력비  $R$ 의 함수로 표시된다.

### (3) 반타원형 표면균열 진전해석

일반 기계요소에서는 다양한 형상의 초기균열이 존재할 수 있으나 선박이나 해양구조물과 같은 박판 구조물에서는 대부분의 초기결함을 표면균열 혹은 관통균열과 같이 단순화 된 형태로 표현

할 수 있으므로 가장 일반적으로 다루어지는 2차원 반타원형 표면균열에 대한 해석기법의 요지를 설명한다.

먼저, 검사과정에서 지나치기 쉬운 정도크기의 반타원형 초기표면균열을 가정하여 균열진전해석을 수행한다. 초기균열이 반복하중을 받고 성장할 때 반타원의 원호를 따라 응력확대계수  $K$ 치가 달라지기 때문에 균열진전량이 위치에 따라 변화하며 따라서 균열이 초기형상을 그대로 유지하지는 못한다. 최근에는 이와같은 표면균열의 형상변화를 정확하게 고려하기 위하여 FEM에 의한 3차원 응력해석을 이용하는 정밀계산 수법들이 시도되고 있으나 아직 설계단계에 적용하기는 어려운 것으로 보인다.[7]

따라서 설계자의 편의를 위하여 초기의 반타원형 균열이 그대로 타원형을 유지한다는 가정하에 타원의 장축 및 단축 측 균열의 길이 방향과 깊이 방향의 진전속도를 추정하는 여러가지 실험식들이 제안되고 있다. [10]~[14] 이때, 응력확대계수는 Newman and Raju의 semi-empirical formual 혹은 Shah and Kobayashi의 이론해가 가장 보편적으로 사용되고 있다. [6][9]

## 4. 피로파괴 제어기술의 향후전망

지금까지 구조물의 피로파괴 현상과 이에 대한 제어기술의 현황을 선형파괴역학적 접근방법을 중심으로 간략히 정리하였다. 현재까지의 연구결과들이 결집됨으로써 피로파괴 제어기술 분야의 기초기술은 거의 정립된 단계에 이른 것으로 보여진다. 그러나 구조물의 사용환경은 고응력, 고온 또는 초저온등으로 더욱 가혹해지는 경향이 있고 고상력강과 복합재료 등 신소재의 사용범위 확대에 의한 경량화 구조설계의 실현, 그리고 생산성 향상을 위한 용접 구조물의 보편화 등에 따라 파괴역학의 적용분야는 점차 확대되고 있으며 이를 뒷받침하기 위한 기초 및 응용연구의 필요성도 더욱 커지고 있다.

특히 좀더 정확한 파괴 안전성평가 기준을 제시하기 위한 노력의 일환으로서 탄소성 연성파괴, 크라이프 균열진전, 미소균열(short crack)의 성

장, mixed mode, 지연효 (retardation) 등 균열의 비선형 전파 및 정지거동에 대한 기존의 연구결과들을 실제 문제에 적용하려는 연구활동이 활발히 이루어지고 있고, 해양구조물이나 항공기 같이 불규칙적인 외하중에 노출되어 있는 구조물들의 피로안전성을 합리적으로 평가하기 위하여 확률론적 신뢰성해석 기법이 도입되는 한편 구조물의 제작, 검사, 유지 및 보수를 위한 종합적인 engineering으로서 FFP(fitness for purpose) 분야의 기초연구 및 실구조물에의 적용연구가 활발히 진행되고 있다.

각종 신소재의 피로파괴 특성에 대한 이론적, 실험적 연구와 함께 용접부의 잔류응력, 열영향부(HAZ) 그리고 고장력강의 용접 등에 대한 재료적, 역학적 파괴특성 규명을 위한 연구가 꾸준히 이루어져 왔고 전산기의 hardware 발전에 의한 대폭적인 계산속도 향상에 힘입어 각종 비선형 수치해석 분야의 기술개발이 수반됨으로써 이를 실제 구조물의 문제해결에 적용하는 사례도 보편화되고 있다.

균열선단 부근의 특이점 거동에 초점이 주어지는 이러한 파괴역학적인 접근 방법은 재료의 결정입자간의 수많은 미소공동이나 미소균열의 생성으로 인하여 야기되는 재료자체의 약화현상을 설명하기에는 부적절한 면이 있기 때문에 최근에는 연속체 손상역학(CDM)을 파괴역학에 접목함으로써 이러한 약점을 보완하려는 연구가 시도되고 있다.

## 참 고 문 헌

- [ 1 ] 김상철, 파괴역학, 민음사, 1985.
- [ 2 ] 이동영, 금속강도학, 문운당, 1986.
- [ 3 ] 노인식, 남용윤, 이호섭, LNG선의 구조안전성 평가(제1보), 선박해양기술 제4호, 1990.
- [ 4 ] 노인식, 남용윤, 이호섭, LNG 선의 구조안전성 평가(제2보), 선해양기술 제6호, 1991
- [ 5 ] 이호섭 외, "LNG선의 구조해석 기술개발(Ⅰ), (Ⅱ), (Ⅲ)," 한국기계연구소 연구보고서, 1989, 1990, 1992.
- [ 6 ] 이호섭 외, 대형구조물의 안전성 시험평가기술 개발, 해사기술연구소 연구보고서, 1990.
- [ 7 ] 한문식 외, 대형구조물의 피로안전성 평가기술 개발에 관한연구, 해사기술연구소 연구보고서, 1992.
- [ 8 ] Broek, D., Elementary Engineering Fracture Mechanics, Noordhoff, 1978.
- [ 9 ] Sha, R.C and Kobayashi, A.S., "Stress Intensity Factor for an Elliptical Crack Approaching the Surface of a Plate in Bending", ASTM STP 513, 1972.
- [10] Kawahara, M., Machida, S. and Itoga, K., "A Consideration on the Fatigue Crack Propagation", 日本造船學會論集, 第136號, 1974.
- [11] Toyosada, M. et al, "Fatigue Crack Propagation from an Initial Deflect-Non-Through Thickness Crack (Failure Analysis Step II)", 日立船舶技報, Vol.39, No.2, 1978.
- [12] Toyosada, M. et al, "Fatigue Strength of Structural Elements with Surface Flaw Located in Highly Concentrated Strain Field", 日立船舶技報, Vol.45, No2, 1984.
- [13] Kawahara, M., Machida, S. and Itoga, K., "A Consideration on the Fatigue Crack Propagation", 日本造船學會論文集, 第 136號, 1974.
- [14] Toyosada, M., "Penetrated Fatigue Crack Opening Displacement and Growth Rate unde Combined tensile and Bending Loading", 日立船舶技報, Vol.39, No.2, 1978.
- [15] IMO, "Code for Construction and Equipment of Ship Carrying Dangerous Chemicals Bulk, Including Its Amendments No.1-7", Resolution A 212(VII).
- [16] 惠美洋彦, 伊東利城, "LNG 船(材料・溶接・および破壊力学), (1)-(35)", 船舶, Vol.47, No.9-Vol.50, No.10, 1974-1977.
- [17] 日本造船研究協會 第8基準 研究部會, "LNG 運船舶の安全基準に關する調査研究報告書", 研究資料 No.51, 昭和 51年 3月.