

파괴역학의 대항역

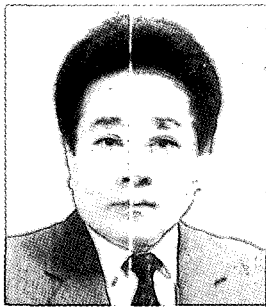
신

기

술

능

항



장 동 일

한양대학교 토목공학과 교수

1. 파괴역학을 낳게한 역사적 배경

1952년 5월부터 영국의 런던과 남아공화국의 요하네스버그간을 왕래하던 첫 제트여객기인 BOAC사 제작 코메트기(GALYP)가 1954년 1월 10일 지중해의 엘베섬 부근 180m 깊이의 물속에 추락 침몰하여 승무원 6명, 승객 29명이 사망한 사건이 있었다. 또 이 파문이 채가지지 않았던 1954년 4월8일 코메트기의 개량형이 나포리 부근 해상에 추락한 사건은 제트여객기의 존재문제가 대두되는 사건이었다. 사고기를 인양하여 파손원인을 조사한 결과, 사고원인은 창틀모서리의 응력집중부에서 발생된 균열이 성장하여 여객기 전체의 파단 분리를 가져온 것이었다. 상세하게 말하면 성층권 비행에서 외부와 내부의 압력차가 반복되어 이것이 응력집중부에 큰 피로피해를 주게 되어, 이것의 누적이 한계치를 넘어선 것이었다. 모든 구조물은 인간에 대한 공용(共用)이 목적인데 예측하지 못한 파괴현상은 이와 같은 사고를 초래하여 인간의 생명을 빼앗는 결과를 가져오게 된다.

위의 코메트기 사고가 주는 교훈은 구조물의 기하학적인 불연속부에 일어나는 응력장의 철저한 파악과 이것에 대한 대응책 없이는 안전성의 확보가 불가함이었다. 이와 같이 피해를 가져온 사고중에서 기록이 남아있는 중요한 것은 아래와 같은 것들이 있다.

(1) 1830년 영국의 모스트로스(Mouströse)

시의 현수교 위에서 보트 경주를 구경하던 70여명의 관중이 교량의 체인이 파단되어 교량이 붕괴되어 강으로 추락하여 다수의 인명피해를 입었다.

- (2) 1866년 영국 맨체스터에서 철도 정류장의 주철제 기둥이 파괴, 지붕이 붕괴되어 열차를 기다리던 승객 수명이 사망하였다.
- (3) 1919년 보스톤시의 당밀탱크가 파괴되어 12명의 사망자와 40명의 부상자를 내었는데, 그 원인은 규정의 2배에 달하는 공용응력 때문이었다.
- (4) 1938년 벨기에의 알버트 운하위에 놓인 핫셀(Hasselt)교가 세토막으로 붕괴된 사고가 있었다.
- (5) 1939년 부터 1945년에 이르는 제2차 세계대전중 미국에서 건조된 리벳형 용접선 4,694척중 1,289척에 파손사고가 있었는데 233척은 그 상태가 흑심하였다. 특기할 것은 약 10척의 선박이 잔잔한 부두에 정박중 두 토막이 난 사건이었다.
- (6) 1944년 미국 스케넥터디시의 구형 수소저장탱크가 공용시작 3개월 만에 파괴 되었는데, 기온이 -12℃였고 균열발생은 응력집중부인 인공구멍이었다. 또한 이해에 미국 크리프랜드시의 2중축 구형 액화 천연가스 저장탱크가 폭발하여 128명이 사망하는 참사가 있었다. 이 탱크의 외측은 평로강이었고 안쪽은 니켈의 합금강이었는데, 사고원인은 열처리

의 미비였다.

- (7) 1962년 호주의 멜버른시의 킹스(Kings)교가 공용 15개월만에 45톤 트레일러가 통과하는 순간 낙교되었다.
- (8) 1965년 영국 윌버 햄프튼시에서 두께 150mm의 원통형 압력용기가 수압시험 도중 파괴되었는데, 이 취성 파괴의 원인은 용접부에 잠재한 균열이었다.
- (9) 1968년 미국의 웨스트버지니아와 오하이오주의 경계에 놓인 체인식 현수교인 포인트 프리센트(Point Pleasant)교가 체인의 응력집중부에 일어난 응력부식현상으로 낙교하였다. 이 사고의 원인은 주변 농경지에서 살포한 화학비료가 응력부식 현상을 촉진한 것으로 판명되었다.

2. 역사적인 파괴사고의 교훈

기계 또는 구조물이 공용도중에 절대로 파괴되지 않도록 재료를 선택, 설계하여 철저한 보수를 하는 것은 기술자에게 주어진 사명인 것이다. 이 사명을 다하기 위하여 기술자들이 최선을 다하고 있음에도 불구하고, 고도로 과학기술이 발전된 현재에도 비행기의 추락, 배의 침몰, 교량의 낙교 및 탱크가 터지는 현상이 가끔 일어나고 있으며, 이로인한 피해는 막대하여 우리들이 이와 같은 파괴사고로부터 받은 교훈은 많을 것이다.

파괴사고의 원인조사에 있어서 제일 많이 보고되어 온 원인은 재료의 결함으로서 이것에 대해 재료 제조업체가 책임을 지는 경우는 우리에게 개운치 않은 느낌을 주고 있다.

일반적으로 구조부재에 결함이 존재하는 것은 허용될 수가 없는 것이나, 현실적으로 공업재료에는 어떤 원인으로든 결함이 개입되게 되어 있다. 또한 기계 또는 구조물의 제작시의 미세한 상처 또는 결함이 발생하는 것은 불가피한 것이다. 좋은 검출정도를 갖는 비파괴 실험을 실시하면 대체적인 결함의 유무(有無)는 판정되지만, 검출정도에 따라 판정이 좌우되며 결함의 종류, 모양 및 치수를 지정하지 않은 한 결함의 유무를 판정하기란 어려운 것이다. 결함의 치수가 허용된 치수(허용결함치수)보다 큰 결함을 진결함(true flaw)이라 하고, 허용된 치수보다 작은 결함은 결함으로 간주하지 않는다. 기계 또는 구조물의 허용결함치수에 대한 안정성과 신뢰성은 파괴역학의 방법을 적용하는 평가에 의하여 확보될 수 있다. 이와같은 평가가 없었던 과거에 기계나 구조물에서 존재를 무시한 결함으로 인한 파괴가 일어난 것은 불가피한 것이었다.

구조부재에 잠재하는 결함을 기점으로 하는 파괴는 아래와 같은 조건에 따라 더 쉽게 일어나게 된다는 것을 알 수 있다.

- (1) 결함의 끝이 예리할 수록
- (2) 결함의 치수가 클 수록
- (3) 재료의 경도 및 강도가 높을 수록

(4) 부재의 치수가 클 수록

(5) 주변의 온도가 낮을 수록

위와 같은 조건을 만족하는 파괴가 파괴역학의 대상이 되며, 이들 조건들을 절대값으로 주어지는 것이 아니고, 다른 조건과 결부된다는 것에 주의하여야 한다.

3. 파괴 및 파괴역학

고체가 응력의 작용으로 두개 이상의 부분으로 분리되는 것을 파괴라고 한다. 파괴의 과정은 균열의 발생과 성장으로 이루어진다고 생각할 수 있다. 고체는 정적하중을 받고 파괴가 일어나기도 하고 반복하중을 받고 파괴될 수도 있다. 구조용부재의 강도특성은 결함이 없거나, 있다 하더라도 아주 작은 것으로 간주하여 시험편으로 시험측정한 항복응력, 인장강도 및 피로한계의 응력만으로 정하는 것이 일반적인 상식이며, 이와 같은 개념에 의한 구조물 또는 기계의 설계는 이 특정값들을 공용기간 중에 넘지 않도록 하는 것이 원칙이다. 그러나 구조물을 만드는 과정에서 불가피하게 재료속에 반드시 결함 또는 균열이 포함되게 마련인데, 이것들의 치수가 어느 한계를 넘는다면 강도는 결함 또는 균열의 치수와 함께 감소된다. 이 경우의 강도특성은 응력과 결함 및 균열의 치수와 결부시켜 생각하는 것이 현명한 일이다. 특히 중요한 것은 이 경우의 강도특성은 평활하고 결함이 없는 시험편의 강도특성과 반드시 비례하는 것은 아니라는 것이다. 그림 1을

참조하면 결함이 없는 시험편에 대한 인장강도 σ_0 는 A강재의 것이 B강재의 것보다 훨씬 높으나, 치수가 같은 각각의 시험편에 한계를 넘어선 크기의 같은 균열이 존재하는 경우 파괴강도 σ_f 는 B강재가 A강재보다 높다는 사실이 시험결과 알려졌다. 따라서 높은 인장강도의 재료를 사용하여 충분히 안전한 설계를 실시한 구조물일지라도 부재에 잠재된 균열이나 공용기간중에 일어난 균열은 구조물을 빨리 파괴에 이루게하는 원인이 된다. 파괴역학은 위에 적은 사실과 같은 결함 또는 균열이 존재하는 경우의 시험편 또는 구조부재의 강도특성을 표시하는(응력과 결함 또는 균열치수와 결부시켜 고려하는) 인자를 찾아내어 이것을 사용하여 강도특성을 밝힘과 동시에 기계 또는 구조물의 파괴방지에 기여하는 것이 그 목적이다.

파괴역학은 결함과 파괴와의 관계를

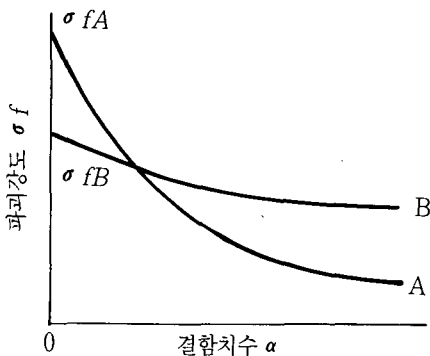


그림1. 결함재의 파괴강도 특성

연구하는 학문으로 파괴역학이란 말은 현재 메릴랜드 대학에 있는 G.R. Irwin 으로부터 시작되었다. G.R. Irwin은 일찍이 미국해군연구소에 근무하였고, 2차 대전중에는 방탄 강판의 파괴에 관한 연구를 담당하였다. 그 과정에서 파괴로부터 파괴의 기초이론을 명확하게 할 필요성이 있음을 알고, A.A Griffith의 생각에 착안하여 Griffith의 파괴이론을 확장하려고 하는 새로운 연구를 시도하였고 이 연구가 지금의 파괴역학으로 발전하게 되었다.

4. 파괴역학의 기초 상식

결함의 끝을 최대한으로 예리하게 만들면 균열이 된다. 따라서 결함끝의 상태를 불문하고 일단 균열로 생각하여 평가하면 안전한 처리가 된다. 연속체 역학으로 취급되는 균열은 그 끝의 곡률반경이 $\rho \rightarrow 0$ 인데 곡률이 존재하는 결함을 가진 시험편에 외력을 작용시키면 결함끝에는 대단히 큰(무한대의) 응력집중이 일어나게 되며 이 때문에 결함끝 부분의 재료는 반드시 항복하여 소성변형을 한다. 이 소성변형을 일으키는 구역을 소성구역(plastic zone)이라 한다. 또한 소성변형의 결과 최초는 $\rho \rightarrow 0$ 의 점모양으로 균열 끝이 둔화(鈍化 blunting)되어 적당한 곡률반경을 갖는 모양으로 입을 벌리게 된다. 이때 최초의 균열끝에서 응력에 수직한 방향으로 일어나는 변위를 균열끝 개구변위(開口變位)라 부르고 Crack

Tip Opening Displacement의 머릿자를 택하여 CTOD로 적고 있다. 그림 2에서 보는 바와 같이 무한폭 부재에 존재하는 균열의 연장선을 x축으로, 원점을 균열의 끝에 두고, 균열 끝 부근의 x축 위에 일어나는 균열에 수직인 응력 σ_y 를 생각하면, 응력과 변형률은 재료의 응력-변형률 관계에 따라 변화한다. 이 경우 소성구역 외부의 탄성응력은 근사적으로 아래와 같은 간단한 식으로 표시된다.

$$\sigma_y = \frac{K}{\sqrt{2\pi x}} \quad (1)$$

윗식을 고찰하면 σ_y 는 $1/\sqrt{x}$ 에 비례하므로 소성구역에 가까울수록 급격히 증가하고 반대로 소성구역에서 멀어지면 급격히 감소함을 알 수 있다. 윗식의 비례상수 K 를 응력확대계수(stress intensity factor, 약해서 S.I.F)라 부른다. 이 식을 일반적인 식으로 표시하면 다음과 같다.

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot F \quad (2)$$

여기서 σ 는 외응력, a 는 균열의 길이이고, F 는 시험편 또는 균열의 모양에 따라 결정되는 무차원적인 계수이다.

식(1) 및 식(2)로부터 균열끝의 탄성 응력분포는 K 는 크기에 따라 그 수준이 결정되는 평행곡선으로 주어짐을 알 수가 있다. 다시 말하면 소성구역 외부의 임의점의 탄성응력은 K 값과 함께 증감한

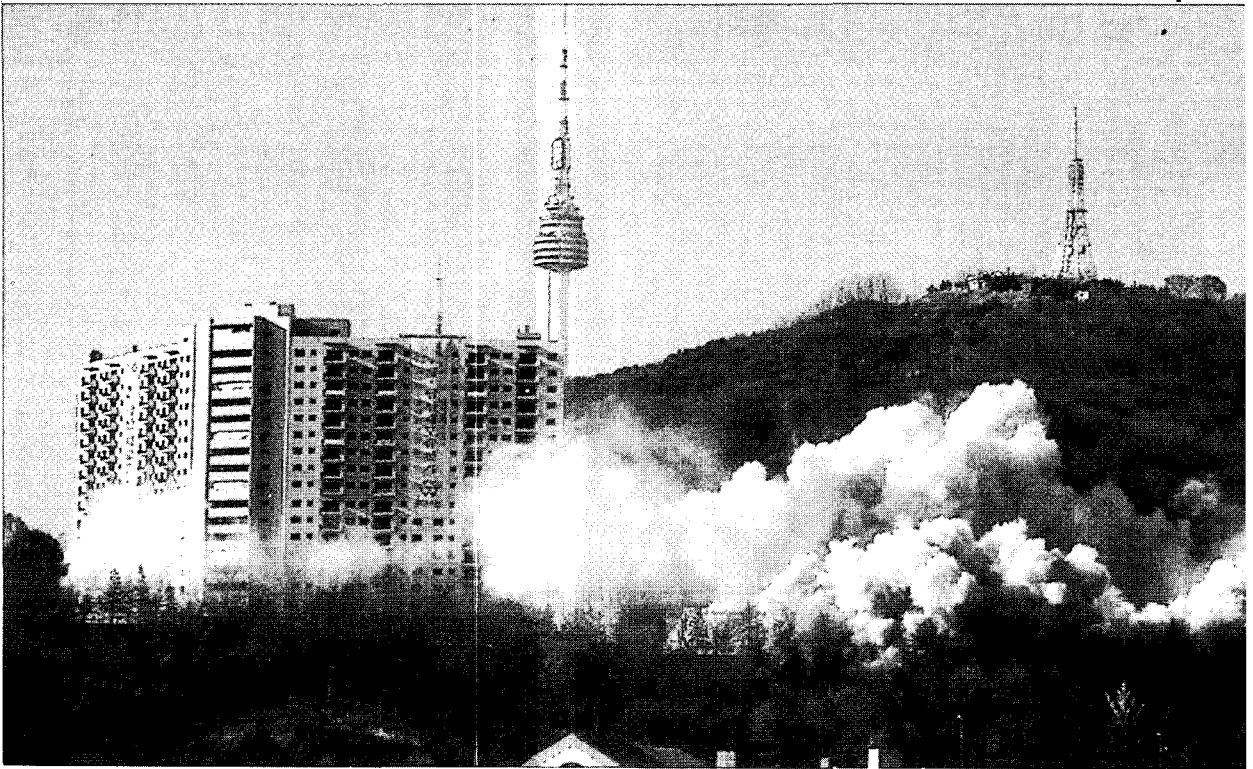
다. 또한 식(2)로부터 알 수 있는 것은 K 값은 외응력 σ 또는 균열의 길이 a 중에서 어느 것이 증가하든지 증가한다는 사실이다. 따라서 σ a 또는 F 가 서로 다른 두개의 시험편을 생각하는 경우 식(2)로부터 계산되며 K 값이 같다면 두 시험편의 균열끝에서는 같은 응력분포를 일으키게 된다. 위의 설명으로 예측할 수 있는 것은 그림 3에 표시한 소성구역의 크기 R_p 와 균열끝개구변위 CTOD도 K 값에 따라 증감한다는 사실이다. 여기서 재료의 응력-변형률의 관계를 강소성체(剛塑性體)로 가정하면 위의 두 인자와 K 값의 관계는 아래와 같은 근사식으로 표시된다.

$$R_p = \frac{1}{10} \left(\frac{K}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (3)$$

$$(CTOD) = \frac{K^2}{2E\sigma_{ys}} = 5\epsilon_{ys} R_p \quad (4)$$

여기서 σ_{ys} 는 항복응력, ϵ_{ys} 는 σ_{ys}/E 인 항복변형률이고, E 는 종탄성계수이다.

균열이 존재하는 시험편에 외력을 계속 가하면 균열끝에는 위에서 설명한 소성변형이 일어난 뒤, 국부적인 파괴가 계속적으로 일어나 균열이 진행하게 되는데, 이 때의 파괴기구(fracture mechanism)는 특정된 원자면간이 분리되는 "벽개(cleavage)" 또는 어떤 개재물(介在物)을 시점으로 "미소공동이 성장, 합체(microvoid coalescence)"된다. 그런



데 앞의 것은 균열끝의 소성구역 내부 또는 탄소성 경계응력이, 뒤의 것은 그곳의 변형률이 각각 파괴의 조건이 된다고 생각되어진다.

소성구역 내부의 응력과 변형률의 관계는 언밀히 말하여 불명확한 것이지만, 이것들이 K 값으로 결정되는 소성구역 외부의 탄성응력, 소성구역의 크기 및 CTOD와 관계를 맺고 있는 것은 당연한 것이다. 따라서 소성구역 내부에서의 변형상태와 파괴기구는 다소의 차이는 있겠지만, 균열끝에서 국부적인 파괴가 일어나는 조건은 아래식으로 정의할 수가 있다.

$$K = Kc \quad (5)$$

여기서 Kc 는 재료에 따른 응력확대계

수의 한계값으로 파괴인성 (fracture-toughness)이라 부르고 있다. 물론 변형상태와 파괴기구의 차이는 Kc 값속에 포함되어 윗식의 엄밀성을 해치고는 있으나 K 라는 한 개의 인자로 파괴조건을 표시할 수가 있는 것은 One parameter of fracture criterion으로서 공학적으로 유용성이 높은 것이다. 한편 국부적인 파괴가 시작된 뒤부터의 균열길이 증분의 시간적 변화, 즉 균열성장속도 da/dt 도 응력확대계수 K 값으로 결정되는 것이 기대되는데, da/dt 와 K 의 관계는 시간 의존성 파괴의 경우에는 대단히 중요한 것으로, 그 관계식은

$$da/dt = f(K) \quad (6)$$

이고 실험측정에 의해 여러 계수들이 결정된다.

5. 파괴역학의 한계

식(1)에서 정도를 생각해보면 $x \rightarrow \infty$ 의 경우 $\sigma_y = 0$ 으로 된다. 그러나 실제적으로는 $x \rightarrow \infty$ 의 경우에는 $\sigma_y = \sigma$ 이어야 한다. 이것을 잘 생각하면 식(1)은

$$x \ll a \quad (7)$$

의 경우에만 유효한 것인데 구체적으로는

$$x \leq \frac{1}{10} a \quad (8)$$

이 범위에서 오차는 7% 미만으로 된다.

소성구역 외부의 탄성응력은 식(1)에 의해서 표시되는데 원점으로부터 탄소성 경계까지의 거리(소성구역의 크기의 1/2) $R_p/2$ 는 위에 적은 x 의 범위안의 것 이어야 한다. 즉

$$R_p/2 < x < a \quad (9)$$

이다. 식(9)는 소규모항복 (small scale yielding, 약해서 S.S.Y)으로 불리우고 식(5)와 식(6)의 사용에 있어서 전제조건으로 되는 것이다. 구체적으로는

$$R_p \leq \frac{1}{25} a \quad (10)$$

이며, 윗 식에 식(3)을 도입하면

$$a \geq 2.5 \left(\frac{K}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (11)$$

으로 되는데 이것이 많이 쓰인다.

앞에서 설명한 바와 같이 항복응력 σ_{ys} 또는 인장강도 σ_f 가 높은 재료는 파괴인성 K_{Ic} 가 낮은 것이므로 식(11)과 같은 소규모 항복조건은 쉽게 만족한다. 그러나 σ_{ys} 가 낮고 K_{Ic} 가 높은 재료에 대해 식(11)를 만족시키는 것은 어려운 일이다. 예를 들면 원자로의 압력용기에 쓰이는 용강재 A533B-1은 $\sigma_{ys} = 50 \text{ kgf/mm}^2$, $K_{Ic} = 500 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ 이어서 식(11)로부터 소규모 항복조건을 만족시키는 균열의 길이는 $a \geq 250 \text{ mm}$ 로 된다.

파괴인성 K_{Ic} 를 결정하는 시험(파괴인성시험)으로 그림 2에 표시한 것과 같은 3점 휨시험을 실시하는 경우가 있는데 균열길이 a 의 시험편 W 에 대한 비를 $a/W = 0.5$ 로 하는 것이 보통이다.

앞에서 설명한 A533B-1강에 대한 소규모항복 조건을 만족하는 파괴인성시험

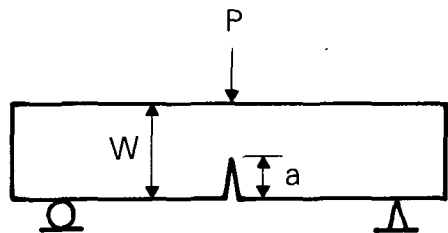


그림 2 3점 휨 시험법

그 응용한계는 구조부재를 이상적인 상태로 생각하면 낮은 항복
 응력의 강제를 사용하는 우리의 실정에는 아주 낮은 것이나
 산업구조의 변화에 따른 고강도강재의 사용증가는 이 학문의
 필요성을 증가시키고 있다.

을 실시하기 위해서는 $W \geq 500\text{mm}$ 의 시험편이 필요하게 된다. 한편 A533B-1강보다 σ_{ys} 가 낮은 강재에 대해서는 필요로 하는 시험편의 치수가 더욱 더 큰 것이어서 사실상 Kc를 얻을 수 있는 시험은 불가능한 것이다. 물론 파괴역학을 적용하려는 구조부재에 대해서 소규모항복조건은 필요한 것이다. 그러나 현실적으로 $a=250\text{mm}$ 인 균열이 존재하든가 이만한 크기의 균열을 생각할 정도로 부재의 치수가 큰 경우는 거의 없다. 여하튼 σ_{ys} 가 아주 낮은 강재에 대해서는 파괴역학의 적용이 그리 간단치 않은 것임을 명심하여야 한다. 소규모항복조건이 만족되지 않는 경우의 파괴조건은 탄소성 파괴역학에서 효과적으로 취급하게 된다. 그런데 부재의 항복응력 σ_{ys} 는 치수에 관계없이 일정한 값이므로 부재가 작을수록 σ_y 는 σ_{ys} 에 접근하여 부재전체가 항복한 뒤(전단면항복)부터 파괴가 일어나게 된다. 소규모항복조건이 만족되지 않던가 전단면이 항복하는 경우에는 파괴가 일어나기 전에 균열끝은 대단히 큰 둔화가 일어나므로 균열의 존재에 의한 파괴강도의 저하는 그리 크지 않다. 파괴역학에 대해 무관심을 용이하게 하

는 여건으로는 종전의 구조용 강재들이 항복강도는 낮고 파괴인성이 높은 점이 었다. 따라서 결함 또는 구조부재자체가 대단히 크지 않은 한 파괴역학에 의한 평가는 필요가 없으며 결함의 존재를 무시하는 종래의 응력에 의한 평가만으로 충분한 것이었다.

6. 맺음말

파괴역학은 최근 싹튼 학문으로서 그 적응성에 수반하여 필요성을 더해가고 있는 실정이다. 그 응용한계는 구조부재를 이상적인 상태로 생각하면 낮은 항복응력의 강제를 사용하는 우리의 실정에는 아주 낮은 것이나 산업구조의 변화에 따른 고강도강재의 사용증가는 이 학문의 필요성을 증가시키고 있다. 또한 공장 제작되는 강구조부재의 대부분이 용접연결인 것은 여건에 따라 급격한 파괴에 직면하게 되어 이것을 제어할 수 있는 학문적 뒷받침을 요구하고 있다. 또한 수요가 증가하고 있는 해양구조물에 가해지는 외력 조건등은 이 학문의 조속한 상식화를 부르고 있다.