講座

파괴역학을 이용한 기계요소 및 구조물 설계방안 (5)

Application of Fracture Mechanics to Design of Machine and Structure Element

仁荷大學校 工大 機械工學科
李 億 燮

4-4 품질관리

품질관리에는 세가지의 중요한 스텝이 있다. 첫째는 소요자재의 관리, 두째는 공장에서 조립할때의 관리, 세째는 출고관리이다. 특수 파괴설계방법론을 이 모든 과정들에 적용시켜야 할 것이다.

4-4-1 수입자재의 품질

자재들을 매입 혹은 수입할 경우에 검사하여야 할 여러가지가 있다.

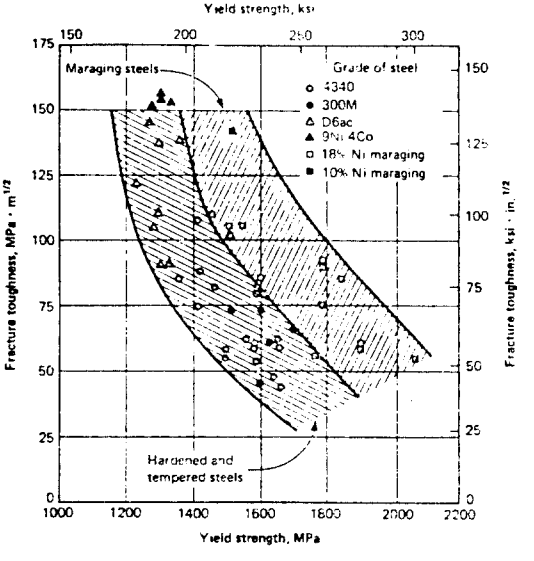
①재료를 매입할 때 성질들이 얼마나 균일한가?

②최소 인성치는 얼마로 보증되어 있는가?

③재료들을 선별하여 거절하느냐, 수락하느냐를 결정하기 위하여 어떠한 비파괴 검사법을 사용하느냐?

수입재료들에 대해서 파괴측정 시험을 해보면 실험방법이나 재료종류들에 관련되어서 실험데이타들에 전형적인 산포현상이 나타나게 마련이다. 예를들어보면 항복응력이 1400 Mpa인 퀜칭하여 템퍼링한 강의 공칭 파괴인성치는 K_{IC}는 90Mpa$\sqrt{m}$일 수도 있고 60 Mpa$\sqrt{m}$일 수도 있다. 아래 그림에 이 현상을 예시하였다.

파괴문제가 중요시 되는 부품에 대해서는 특수하게 파괴인성치를 규정하여 재료를 구입하여야 한다.



4-4-2 공장내에서의 품질관리

부품을 조립할 때 품질관리에 대한 주의를 해야 한다.

①용접이나 기계가공공정들이 재료의 성질이나 재료의 성능에 어떠한 영향을 미치는가?

②응력제거(용접이나 도금후의 열처리 후) 공정의 열싸이클은 재료의 성질을 변화시키는가?

③Pickling, plating, nitriding 혹은 carburizing과 같은 표면처리 공정들이 Subcritical (안정) 균열성장에 대한 거동을 변화시키는가?

재료공학자는 부품조립공정이 수입제품의 본래의 파괴인성치나 안정균열성장의 민감성에 영향을 미치는 여부를 검토하여야 한다. 용접공정과 같이 파괴인성치에 영향을 미치는 공정후에는 반드시 다시 파괴인성치를 측정·검토하여야 한다.

4-4-3 출고제품의 품질관리

출고제품에 대한 최종점검을 하기 위하여 부품들이 사용되는 상황에서 안전한 결함크기를 포함하고 있나의 여부를 확인하기 위하여 어떠한 비파괴검사나 설계방법을 사용하느냐 하는 것도 문제가 된다. 비파괴검사법과 어떠한 비파괴검사법을 사용하는가 하는 문제는 ASM Metal Handbook 10권을 참고하기 바란다.

4-5 재료의 선택

새로운 기계구조물들을 설계를 할 때에 거시적이나 미시적인 파손기구를 모두 예측하여 설계를 한다는 것이 매우 어렵다는 것을 선진국의 설계자들은 지난 20수년간 경험하고 있는 실정이다. 그러니까 결국 설계시방에 맞는 재료를 선택하는 과정은 엄밀히 말하면 어떤 기계구조물의 파손해석 결과 나타난 특수한 결과 즉 재료/하중/환경 조건들의 조합의 부적합성으로부터 다시 재료를 선택하는 과정이라고 하는 것이 타당할는지 모른다. 그러나 실제적으로는 재료선택 과정에서는 실험실의 데이타를 기초로 사용할 수도 있고 이전의 관념을 토대로 재료를 선택하는 경우도 있을 것이다. 이러한 설계/재료선택 과정은 아직까지 미숙한 단계이므로 위의 두가지의 과정에 불일치가 존재할 수 있는 것이다.

다음에 아래의 3가지의 개념을 기초로 하여 재료를 선택하는 방법을 소개한다.

①K_{IC}, 파괴인성치

②△K, 피로균열전파

③K_{Iscc}, 응력부식크랙킹 threshold

강, 알미늄합금 및 티타늄합금으로 만든 부품에 응용하는 예를 들어보기로 한다.

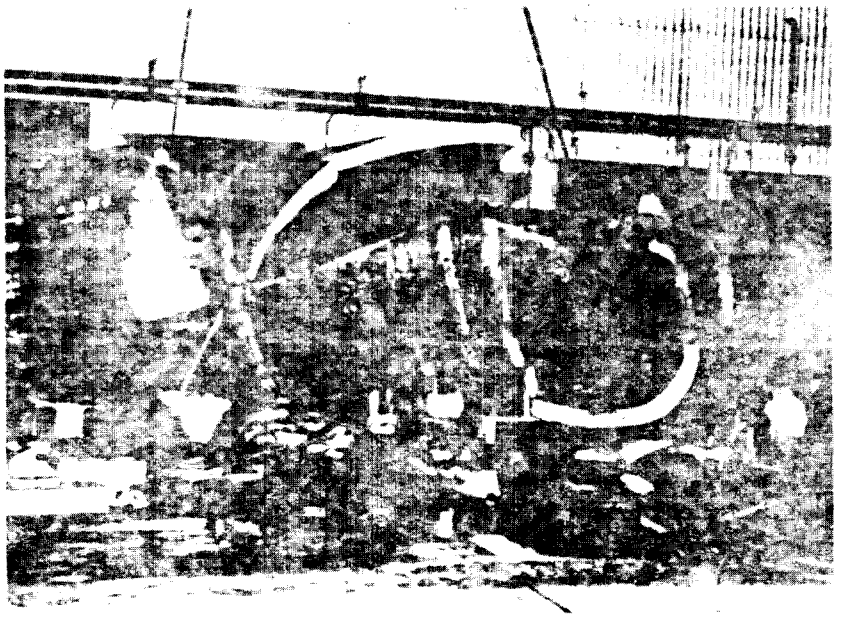
4-5-1 K_{IC}를 이용하는 경우

4-5-1-1 압력용기

파괴역학 기술을 압력용기설계나 재료의 선택에 응용하기 시작한 것은 1960년대 초기부터였으며 주로 항공기 산업분야의 미사일 모-타 케이스이었으며 이후 석유화학플랜트의 취성파괴에도 응용하기 시작하였다. 다음에 예시한 사고는 수압교정시험을 행하는 동안에 일어난 파손사고이며 파손사고 후에 파손의 원인을 규명한 결과 여러가지의 원인을 찾아낼 수 있었으며 여기에 설명한다.

다음 그림에서 보는 바와 같이 두께가 0.15 m, 직경이 2 m, 길이가 18.2m인 암모니아 저장탱크가 수압시험을 하는 도중에 파손되었다. 이때의 압력은 운전압력인 35Mpa의 99.8 % 정도이었으며, 교정압력은 운전압력의 140 % 상승시킬 예정이었다.

파손의 근원을 추적하여 본 결과 균열의 시작점은 용접열 영향부에 존재하는 길이 8 ㎜ 정도의 미세한 표면균열로 밝혀졌다. 사용재료는 Mn-Cr-Mo-V강이었으며 이것의 단조품의 파괴인성치는 120Mpa$\sqrt{m}$이었으며 용접부의 인성치는 적절한 응력제거법을 쓰지 않았으므로 58Mpa$\sqrt{m}$로 저하되어 있었다. 파괴인성치를 58Mpa$\sqrt{m}$로 간주할 때, 전체작용응력을 작용멤브레인 응력과 잔유응력이 중첩된 값으로 생각해야만 파손을 야기한 압력값이 정당하다는 계산결과가 나왔다. 이러한 계산결과와 과도한 경도값의 상승, 열영향부의 저인성값 등을 고려하여 파손의 원인을 추적한 결과 잔유응력을 제거할 때에 응력제거로 안에서 압력용기가 균일하게 열을 받지 못하여 발생한 부분적인 냉점(cold spot)이 파괴의 근원점이었다는 결론을 내렸다. 따라서 이러한 압력용기는 재질자체를 바꾸지 않고, 냉점이 발생되지 않도록



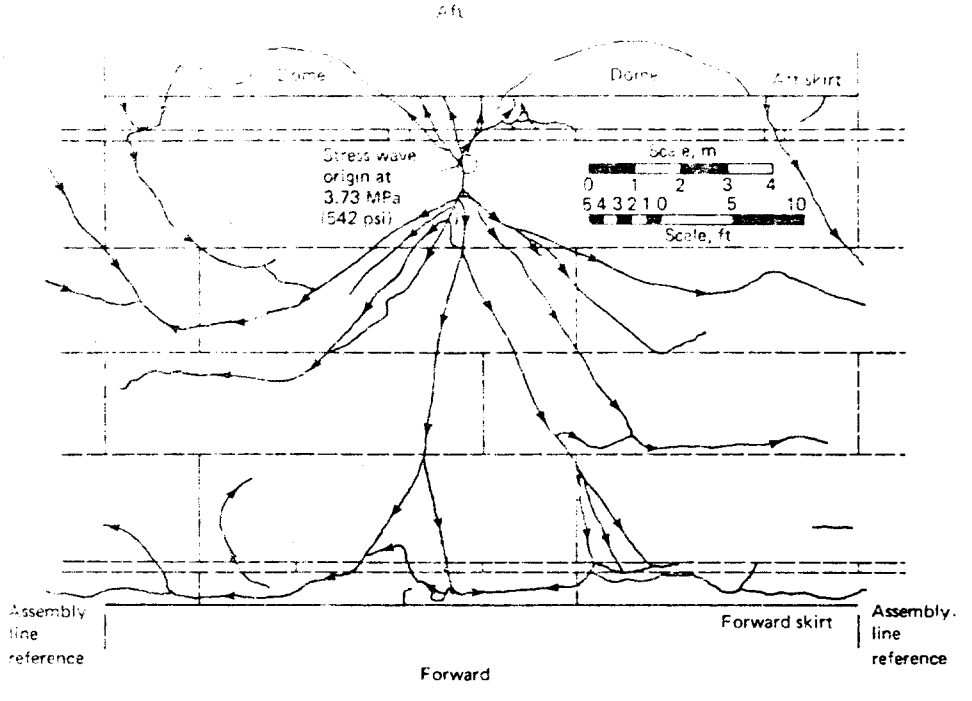
Origin of fracture is indicated by arrows.

하고, 냉점이 발생할 여지가 있는 부분에 대한 수리를 해주면 이러한 파손사고를 방지할 수 있다는 결론을 얻었다.

2단 미사일 모-타 케이스를 수압시험 하는 도중에 파손된 예도 있었으며 이 경우의 균열의 근원은 시임용접부의 가장자리인 것을 발견하였다. 이 케이스는 AISI 4340 강으로 만들었으며 열처리 한 후의 항복응력은 1450Mpa 이었다. 전반부의 도움(dome)과 후반부의 연돌(funnel)을 원주 주위에 원주방향 시임용접을 하여 부착시켰으며 그후 열처리하여 잔유응력을 제거시켰다. 균열들이 용접부에 발생하였다. 성능이 좋은 비파괴검사시험법을 사용하여 용접부의 균열발생을 조기에 발견하였더라면 전체 파손 사고는 발생되지 않았을 것이라는 결론을 얻었다. 또한 약간 더 고온으로 템퍼링함으로서 인장강도 측면에서 보면 강도는 약간 저하할 우려도 있으나 반면 파괴인성치는 증가하니까 파손방지에는 더 좋은 효과를 나타낼 수 있을 것이다.

위의 두 예에서 적절한 열처리 공정이 파손방지에 매우 중요하다는 것을 알았다. 아래 그림은 18Ni 마레이징강으로 된 직경 6m인 로케트 모-타 케이스가 수압시험 도중 파손한 상태를 나타낸 것이다.

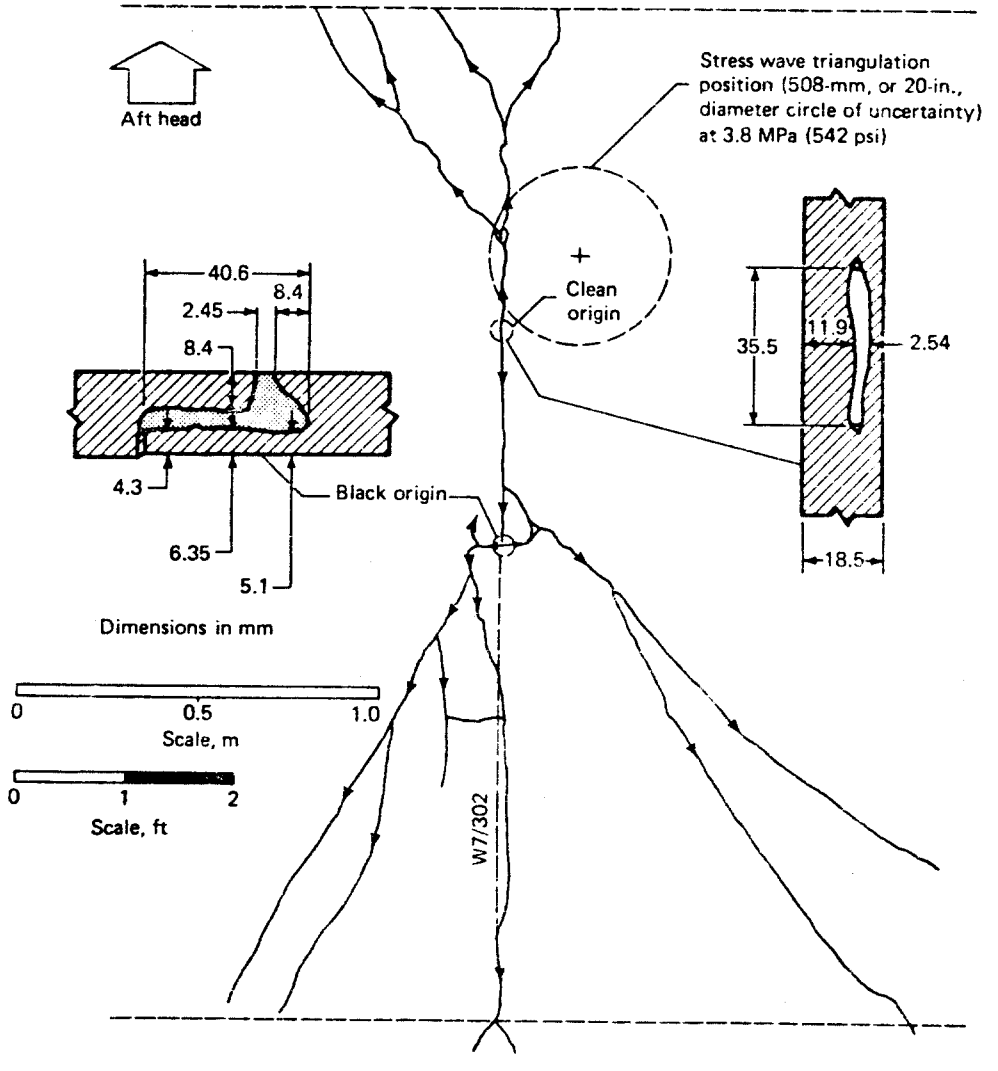
이 경우에는 파손된 원인이 열처리를 잘못한 데서 기인한 것이 아니고 설계에 적절한 재료를 잘못 선택했기 때문이라고 밝혀진 바 있다. 6.6Mpa 으로 최대수압시험을 하기로 계획되었었으며 이는 최대설계응력보다 10% 높은 값이었다. 수압이 1.7Mpa 이상 되었을 때 응력파가 발생되어 나옴을 용기에 부착시킨 가속도계로서 감지할 수 있었으며 이는 균열선단에서 발생되어 나오는 것으로 판단되었다. 수압이 3.8Mpa 정도로 증가되었을 때 다른 응력파가 검출되었으며 관제탑에서 파손되었다고 보고하였다. 파손된 부분들을 맞추어서 균열표면에 발생한 쉐브론 마-크를 관찰하면서 균열의 근



Arrowheads indicate directions of fracture propagation. Dashed lines indicate welds.

원지를 찾았다. 이것이 다음 그림에 나타나 있다.

다음 그림에는 응력과 방출 양상에서 추정한 균열근원지를 나타내었다.



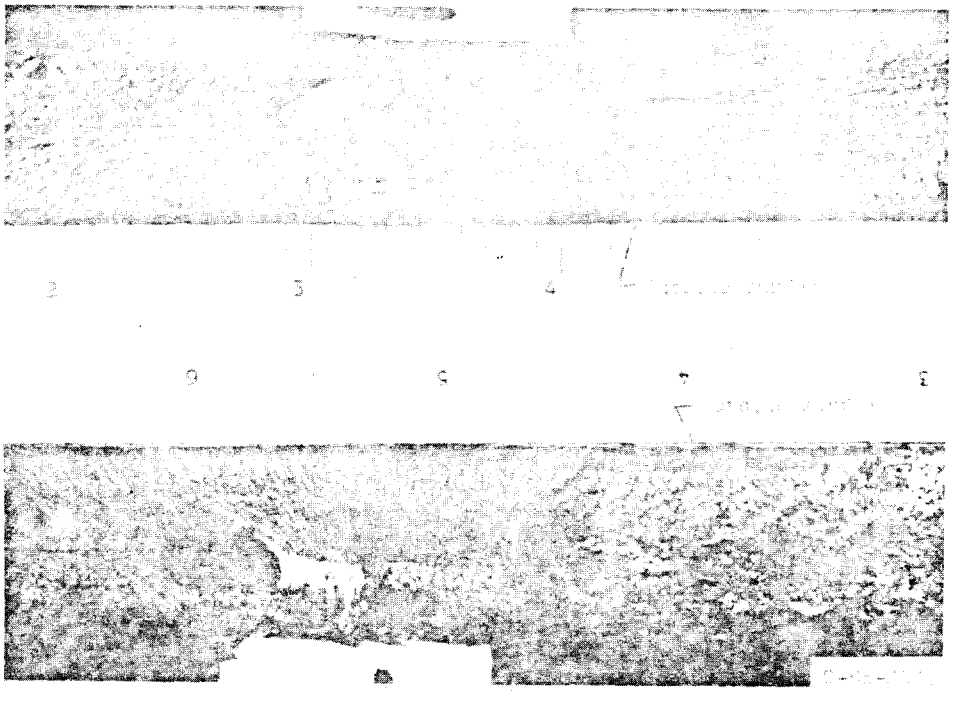
Inset sketches show shapes and dimensions of the two origins.

윗 그림에서 660Mpa 크기의 응력에서 파손을 야기하기에 충분한 크기의 균열이 용접선(W7/302)에서 발견된 것을 알 수 있다. 이 응력값은 60Mpa$\sqrt{m}$의 응력확대 계수값에 상응되며, 이 재료의 파괴인성치 보다는 매우 낮은 값이지만 용접열영향부나 용접부의 인성값 보다는 매우 큰 값이다. 이 경우, 즉, 로케트 모-타 케이스에 대하여 행한 재료의 선택, 설계, 파손해석을 다음표에 상세하게 기술하였다.

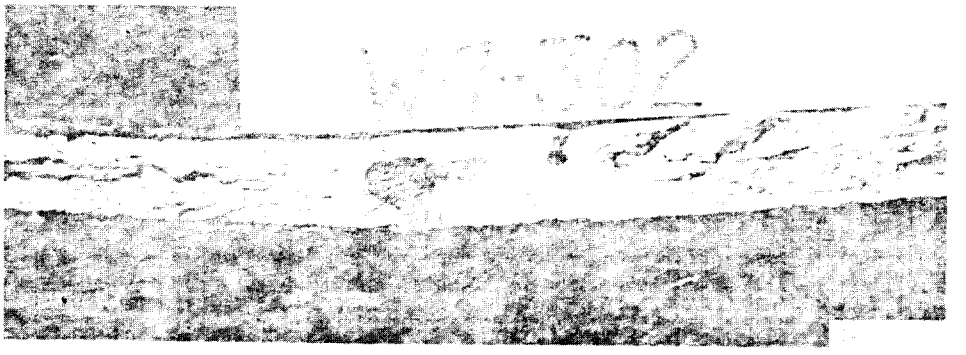
다음 표의 데이타를 자세히 관찰해 보자 안전계수가 보수적이 아니라는 사실은 제쳐두고라도 다음 표중의 해석에서 경종을 울리는 사항은

Requirement	6.0 MPa (875 psi) design pressure. Welded cylindrical structure 6.6 m (260 in.) in diameter
Materials selection	Grade 250 Maraging Steel σ_{ys} (plate) ≥ 1590 MPa (230 ksi) 90% weld efficiency ≥ 1420 MPa (207 ksi) 1.33 safety factor ≥ 1070 MPa (156 ksi) K_{Ic} (base plate) = 87 MPa · $m^{1/2}$ (79 ksi · $in.^{1/2}$) K_{Ic} (weld) = 58 MPa · $m^{1/2}$ (52.9 ksi · $in.^{1/2}$)
Design (vessel thickness)	Membrane stress $\sigma = \frac{PR}{t}$; t ≥ 18.5 mm (0.73 in.)
NDE	Ultrasonic, radiographic, magnetic particle: > 1.8 mm (0.071 in.) in plate > 1.15 mm (0.045 in.) in weld — reject
Hydrotest	110% of design = 6.6 MPa (960 psi) internal pressure
Premature failure	56% of desired hydrotest = 3.8 MPa (542 psi)
Failure analysis	Origin 5.6 mm (0.22 in.) deep (2a) by 35 mm (1.4 in.) long (2c) caused failure at a membrane stress of 660 MPa (96 ksi) a/2c = 0.07 Q ≈ 1 (see Fig. 9.4) a_c = 2.8 mm (0.110 in.), σ = 660 MPa (96 ksi) $K_I = \sigma\left(\frac{\pi a}{Q}\right)^{1/2}$ = 62 MPa · $m^{1/2}$ (55 ksi · $in.^{1/2}$) $K_I > K_{Ic}$ (weld) at failure.

비교적 큰 표면밑의 위험한 내부균열이 비파괴검사에서 쉽게 검출되지 않을 가능성이 많았다는 것이다. 즉 1.15㎜ 깊이의 표면균열이 있으면 그 재료는 사용을 못하도록 설계시방으로 규정하고 있으나 길이 35㎜, 폭이 5.6㎜인 균열이 존재하고 있으면서 검출이 되지 않았으니 이 균열 때문에 파손사고가 일어난 것이다. 다음 그림에 문제되고 있는 결함의 거시적인 모양을 나타내었다.



다음 그림은 열처리한 후에 산화된 비교적 큰 결함을 보여준다.



만약 사용재료를 위의 예에서 사용한 Grade 250강을 Grade 200강으로 대치한다면 항복강도는 10% 정도 감소하지만, 용접부 파괴인성치는 100%정도 상승한다. 따라서 Grade 200강을 사용해서 만든 직경 6.6m인 motor firing of chambers의 수압시험에는 아무런 이상 없었다는 보고가 있다.

4-5-1-2 파이프라인에 쓰이는 강

파이프라인에 사용되는 저강도강에 대해서는 많은 실험결과와 품질보증평가의 예들이 알려져 있다. 직경 0.76m인 파이프 라인에 가상균열을 넣어 풀-사이즈 테스트한 결과도 발표되고 있다. 파이프가 파손될 때의 원주방향응력을 측정하여 두가지의 모델링으로 예상되는 예측 값과 비교한 결과를 아래에 소개한다. 첫번째 것은 평면응력상태의 경우로서 균열선단에 발생한 소성영역을 고려한 것이다. 원통용기에 존재하는 종방향 관통균열에 대해서 아래의 식이 제안되고 있다.

$$K_c^2 = \frac{\pi C \sigma_h^2}{\cos\theta}\left(1+1.61\frac{C^2}{R\cdot t}\right)\left(\frac{4-K}{2}\right) \quad \cdots\cdots (18)$$

여기서,

K_c = 임계응력확대계수, Mpa$\sqrt{m}$

$2C$ = 종방향 균열길이, m

R = 용기의 평균반경, m

t = 용기의 두께, m

θ = $(\frac{\pi}{2})$ (σ_h/σ_c)

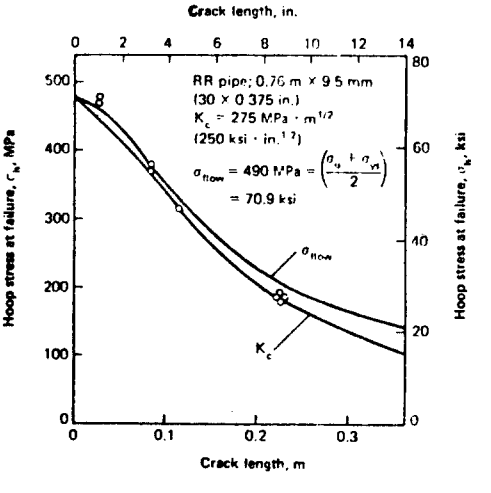
σ_h = 공칭원주방향 파손응력, Mpa

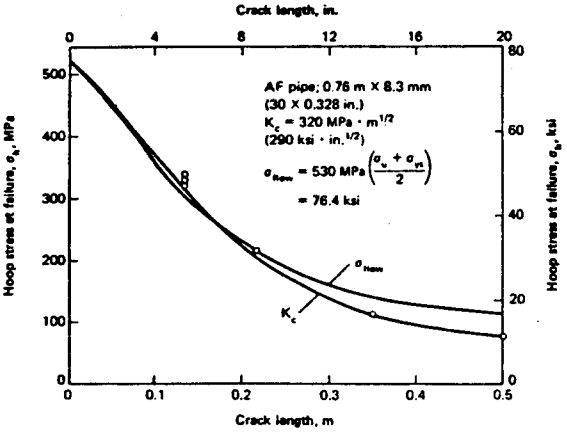
σ_c = 결함없는 용기의 파손응력, Mpa

K = $(3-\upsilon)/(1+\upsilon)$

υ = 포아손의 비

두번째 것은 소성 불안정성 모델로 알려져 있는 것으로써 (항복응력+극한강도)/2=σ_{flow}를 이용하여 파손(burst)압력을 예측하는 것이다. 다음 두 그림에서 관통균열의 크기의 범위가 0.025m에서 0.5m까지인 경우에 위의 두 모델링의 타당성을 입증하고 있다.





윗 그림을 보면 길이가 긴 균열의 해석에는 파괴인성치에 기본을 둔 경우가 실험치와 잘 대응하고 있는 것을 알 수 있다. 저강도강으로 만든 여러가지의 반경/두께 비를 가진 압력용기에 대해서는 소성불안정 모델링으로 파손강도를 잘 예측할 수 있다는 것을 알 수 있으며 파손강도는 아래의 식으로 구할 수 있다.

$$\sigma_h = \bar{\sigma}_{flow} \left[1 + 1.61 \frac{C^2}{Rt}\right]^{-1/2} \quad \cdots\cdots (19)$$

여기에서

$\bar{\sigma}_{flow}$ = 평균유동응력이며 저강도 구조용강에 대해서는

$$\bar{\sigma}_{flow} = 1.04\,\sigma_{ys} + 69\text{Mpa} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (19)'$$

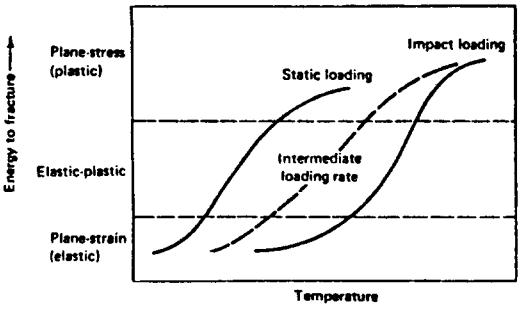
여기에서,

σ_{ys} = 항복응력, Mpa

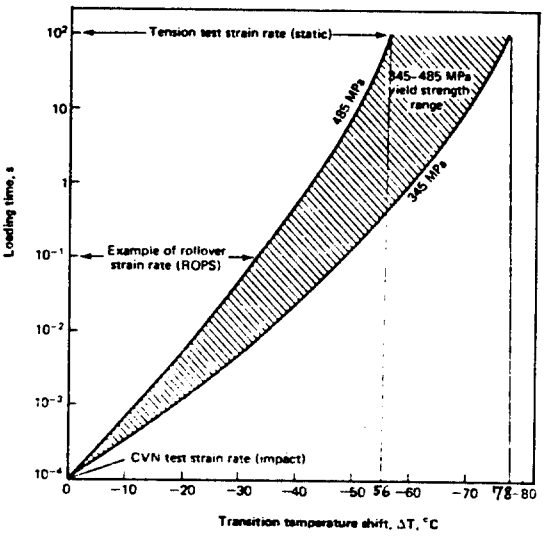
아래 그림은 관통균열에 대한 45번의 수압시험 결과와 위의 평면응력해석으로 얻은 예측값을 도시한 것이며 두꺼운 압력용기에 존재하는 부분관통균열이나, 고강도강에 대해서는 평균변형파괴인성치나 탄소성 해석으로 모델링 한 값들을 사용해야 될 것이다.

4-5-1-3 Rollover 방지 구조물(ROPS) : 동적파괴인성치

Rollover 방지 구조물의 재료선택과정이나 설계과정에도 파괴역학에 기본을 둔 개념을 이용한다. off-the-road vehicle의 roll bars에 사용되는 재료들은, 동적인 파괴저항의 요구조건을 만족하여야 한다. Rops의 특징은 이들의 굽힘하중을 받을 때 단한번 이들(Rops)의 성능을 발휘하도록 구조적으로 설계되어 있으며, 이 기능을 발휘하는 동안 부서지지 않도록 파손설계를 해 주어야 하는 것이다. 물론 인장강도나 굽힘강도도 고려하여야 하겠지만 여기서는 파괴저항에 대해서만 논의하도록 한다. 재료/설계의 측면에서 보면 온도, 재료의 두께, 하중속도 등의 파괴저항에 대한 영향을 산정하여야 된다. 이렇게 산정된 여러 영향들을 고려하여 동적 K_{IC}와 샬피 V-노치 충격에너지 사이의 간단한 관계를 유도할 수 있으며, 이들을 재료선택/설계에 응용하는 것이다. 어떤 주어진 하중속도에 대하여, 구조용 강의 인성치는 온도가 저하하면 매우 저하하며, 또 하중속도가 빠르면 인성치가 매우 저하한다. 아래 그림에 이 현상을 도시하였다.

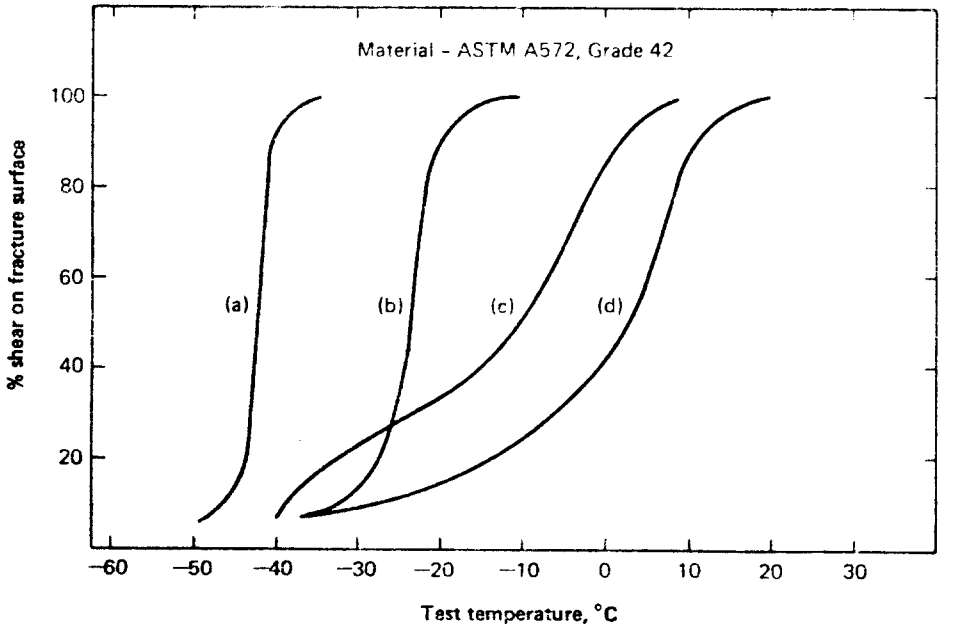


소성구역(평면응력)에서 탄성구역(평면변형)으로 천이가 일어나는 사실을 윗 그림에서 알 수 있으며, 하중속도에 따라 온도의 범위가 바뀌어진다는 사실도 알 수 있다. 다음 그림에 일정한 두께의 구조용강에 대한 천이온도의 변화를 도시하였다.



윗 그림은 항복응력이 345～485Mpa인 강에 대한 것인데, 정적하중/충격하중에 대한 천이온도의 이동량은 대개 56/78℃인 것을 알 수 있다. 항복응력이 이것보다 낮은 강에 대해서는 천이온도의 이동량이 더 크다는 실험결과가 보고되고 있다. 온도와 하중속도의 상호관계 이외에도 재료의 두께도 파괴인성치에 지대한 영향을 미친다. 아래 그림에서는 이 두께의 영향을 도시하였다.

아래 그림에서 두께가 25㎜인 시편과 16㎜ 두께인 시편의 전단파손부분의 퍼센트를 비교해 보면 충격시험 및 정적시험을 한 경우 평면변형이 주로 일어나는 두꺼운 시편의 경우에 인성-취성 천이온도가 각각 10℃와 20℃ 정도씩 상승하는 것을 알 수 있다.(이 경우의 천이온도는 전단파손부분이 전 파손단면의 50% 인 경우로 택했다.)즉, 두께나 하중속도의 증가는 천이온도를 상승시키는 결과를 가져온다. 두께나 하중속도 혹은 온도가 인성치에 미치는 영향을 고려하여, 동적파괴인성치와 샬피충격치의 상호관계를 기본개념으로 최종적으로 소재를 선택해야 한다. 다음 그림에 A36과 A572 강에 대한 한 예를 도시하였다.



(a) Slow bend; 16-mm- (0.62-in.-) thick DT specimen. (b) Slow bend; 25-mm- (1-in.-) thick DT specimen. (c) Impact; 16-mm- (0.62-in.-) thick DT specimen. (d) Impact; 25-mm- (1-in.-) thick DT specimen.