

파괴역학 연구의 고찰

具 寅 會

<中央大 工大 機械工學科 · 工博>

1. 서 론

역사가 비교적 짧은 파괴역학의 발달은 최초에 크랙 혹은 크랙과 같은 금속결합이 구조물에 치명적인 결과를 가져올 수 있다는 관찰에서 출발하였다. 특히 2차 세계대전 중에 미국이 대량으로 건조한 전함 Liberty에 생긴 문제가 제기가 되어 미해군연구소(ONR)의 Irwin 연구팀이 應力擴大係數와 그것의 실험임계값인 파괴靱性を 제안⁽¹⁾한 이래 파괴역학연구는 활발히 이루어지고 있다. 더욱이 오늘날 기계설계에서 높은 신뢰성이 요구되고 운전중인 항공기나 원자로 등에서의 부품파괴가 초래할 수 있는 공중의 안전문제나 경제적 손실을 감안할 때 파괴역학 연구의 중요성은 더욱 인식되어 가고 있는 것 같다.

파괴역학 연구를 대상재료에 의해 구분하면 선형파괴와 탄소성재료의 파괴로 나눌 수 있다. 몇몇 취성재료를 제외하면 이러한 구분은 명확한 것이 아니다. 선형탄성 파괴역학은 운용상 크랙끝의 소성항복영역의 크기가 크랙길이에 비해 아주 작아야 크랙끝의 최근접 부분을 제외한 크랙부근에서 다음의 탄성응력분포가 유효하다는 판단에 기초를 두고있다.

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} f_{ij}(\theta) \quad (1)$$

취성파괴(brittle fracture)를 다루는 선형탄성 파괴역학연구는 주로 여러가지 크랙의 모양, 시편모양, 부하형태에 따른 탄성응력분포 혹은 應

力擴大係數를 구하거나 에너지방법에 의해 안정 불안정 크랙전파를 연구한다. 많은 파괴역학연구의 다수가 이에 속하며 현재의 이론들이 대체로 정립된 상태이고 또한 일반적으로 유한 요소법에 의한 정역학적 해석이 경제적이고 별 어려움이 없기 때문에 이 분야에서 근본적인 연구과제는 별로 없는 것 같다. 다만 크랙전파의 동적 특성에 대한 연구는 아직 많은 여지가 있고 이것의 한 응용 예로서는 유전시추시 사용되는 압력파괴(hydranlic fracture)를 들 수 있다. 이는 파괴영역을 조절함으로써 기름누출을 방지하고 시추회수를 줄이는데 목적이 있다.

대개의 경우 취성파괴는 전체 구조물에 치명적이 되기 쉽다. 따라서 구조물 설계시에 취성파괴의 가능성을 배제하기 위해 재료의 적절한 선택과 같은 대책을 강구하는 것이 바람직하다. 다시말해, 구조물 재료는 강도와 연성의 상황에 따른 적절한 조합을 필요로 한다. 오늘날 특수합금과 같은 고강도 금속에서의 취성화 경향이 증가하나 합금설계시 강도와 아울러 연성을 증가 시키기 위한 여러 대책이 파괴역학 연구의 중요한 부분을 차지한다.

2. 탄소성 재료의 파괴

일반적으로 금속의 파괴靱性試驗에는 여러가지 어려움이 있다. 예를들면 실험 데이터의 일관성을 찾기가 힘들고 또는 하중-변형 선도가 비선형을 나타내는 수가 많다. ASTM에 의한 실험절차는 파괴 불안정(fracture instability)점을

구하려던 파괴靱性的 본래 목적을 약간 벗어나서 파괴 개시(fracture initiation)을 나타내는 수가 있다. 또한 ASTM⁽²⁾에서 추천하는 시편모양이 실제의 상황과는 상당한 차이가 있을 수 있기 때문에 파괴靱性값을 통해 서로 다른 재료의 상대적 비교는 가능하지만 그 값을 실제의 경우에 그대로 적용하는데는 異見이 있을 수 있다. 이러한 문제들의 발생은 대체로 크랙끝에서의 소성 변형 영향을 기인하는 것이다. 따라서 ASTM은 정당한 파괴인성시험을 위해 소성변형 영역이 크랙길이 보다 아주 작아야 한다는 조건을 다음과 같이 표시한다.

$$K_I < Y\sqrt{a}/\sqrt{2.5} \quad (2)$$

여기서 Y 는 재료의 인장항복응력이고 a 는 크랙길이이다. 중앙균열을 가진 板材의 경우에 최대허용 應力擴大係數에 대한 부하응력은 $\sigma_\infty = 0.36Y$ 밖에 되지 않는다. 다시말해 그 이상의 부하응력에 대한 크랙부근의 응력분포는 式(1)과 같이 되지 않음을 의미한다.

소규모 항복(small-scale yielding)이라 부르는 것은 크랙끝에서 먼 곳의 탄성응력 분포가 크랙끝의 소성변형 존재에 관계없이 式(1)과 같이 될 때를 말한다. 이 경우 소성변형 영역에서의 응력분포가 r 이 증가함에 따라 점진적으로 탄성응력 분포에 접근하므로 이를 경계층 형태(boundary layer type)라고 부르기도 한다. 따라서 소규모 항복이론은 그 적용범위가 式(2)에 의해 제한 받는다. 다음 식으로 표시되는 가공경화 재료에 대해

$$\varepsilon = \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{n-1} \frac{\sigma}{E}$$

크랙끝의 근접부분(소성변형 영역보다 훨씬 작은 영역)에서 응력과 스트레인 분포는 Hutchinson⁽³⁾과 Rice and Rosengren⁽⁴⁾에 의해 평면변형과 평면응력의 모든 경우에 적합한 식을 다음과 같이 표시된다.

$$\sigma_{ij} = \sigma_0 \left(\frac{EJ}{\alpha \sigma_0^2 I_n r} \right)^{\frac{1}{n+1}} \bar{\sigma}_{ij}(\theta, n) \quad (3)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\alpha \sigma_0}{E} \left(\frac{EJ}{\alpha \sigma_0^2 I_n r} \right)^{\frac{1}{n+1}} \bar{\varepsilon}_{ij}(\theta, n)$$

여기서 r, θ 는 크랙끝에 중심을 둔 좌표이고

I_n 은 적분상수로 평면응력과 평면변형에 대해 각각 표시된다. $\bar{\sigma}_{ij}, \bar{\varepsilon}_{ij}$ 는 무차원 함수이고 J 는 널리 알려진 J -적분값이다. 이 해를 HRR場이라 부르고 J 는 크랙끝 부근에서의 변형강도에 해당된다. 특이할 점은 이것이 항복규모에 관계없이 적용되는 해석이다. 이 해는 Prandtl slip-line場의 부채꼴 영역(fan zone)에서 유추된 $\sigma \varepsilon \propto \frac{1}{r}$ 에 근거를 두고 있다. HRR場 해석의 몇가지 문제점을 소개하면: (i) 式(3)은 유도과정에서 소성의 변형이론(deformation theory of plasticity)을 사용하므로 비선형 탄성해석이라 부를 수 있다. 따라서 부하의 감소나 제거를 포함하는 문제에는 적합하지 않다. (ii) HRR場의 크기는 가공경화에 좌우되고 비경화 재료에서 그 크기는 영에 접근한다⁽⁵⁾. 따라서 式(3)의 연장은 확인된 슬립라인(slipline) 해석에 접근하지 않는다. 또한 HRR場의 크기가 시편의 부하방법에도 좌우됨이 유한 요소계산에 의해 알려져 있다⁽⁶⁾. (iii) 크랙끝에서 blunting의 영향을 받는 영역에서 J -적분값은 path-dependent 이므로 이러한 영역에서 式(3)은 정당하지 않다⁽⁷⁾. 이러한 문제점에도 불구하고 式(3)은 크랙끝의 근접부분에서 유일한 해석적 해답이고 유한요소법에 의해 비교적 정확하다는 것이 알려져 있으므로 널리 인용되는 해석이다.

式(1)과 式(3)의 비교에서 알 수 있는 바와같이 선형탄성 파괴역학에서의 응력擴大계수 K 의 역할이 탄소성 재료에서의 J -적분값의 역할로 바뀌었다. 다시말해 J -적분값이 동일하면 시편모양이나 부하방법에 관계없이 응력/스트레인 분포가 式(3)으로 동일하게 표시된다.

따라서 HRR 해석에서는 크랙끝의 변형상태를 결정하는 단일 파라미터가 J -적분값이다. J -적분값은 또한 이론상 crack opening displacement(COD)와 단순한 선형관계에 있으므로 단일 파라미터를 COD로 표시하기도 한다. 그러나 대규모 항복범위에서 J -적분값과 COD의 적용은 서로 다른 결과를 가져올 수도 있다⁽⁸⁾. 크랙끝의 변형상태를 특정지을 수 있는 한개의 파라미터를 찾는 데 대한 연구는 실험이나 이론을 통해

활발히 이루어져 왔다⁽⁶⁾. 그러나 완전소성 해석에서는 한개의 파라미터는 존재하지 않는다⁽⁹⁾. 소규모 항복범위에서 J 적분값(혹은 COD)는 부하응력 σ_{∞}^2 에 비례하나 그외의 범위에서는 J 적분값은 σ_{∞}^2 에 비선형으로 변하고 실험이나 수치적 방법을 통해 얻는다.

Begley and Landes⁽¹⁰⁾는 선형탄성 파괴역학에서와 비슷한 방식으로 J 적분값의 임계값 J_c (혹은 COD_c)가 크랙성장의 개시점을 나타내는 것으로 제안하였다. 이 실험을 J 파괴靱性試驗이라 하고 K_{Ic} 실험에서와 마찬가지로 시편크기에 대한 조건이 있다. 더 나아가서 크랙성장의 개시 이후 크랙전파에 대한 저항이 dJ/da 에 비례한다는 제안도 있다⁽¹¹⁾. 이러한 제안들은 J 적분값이 물리적으로 크랙성장에 따른 potential energy release rate($J = -\frac{\partial(P.E.)}{\partial a}$)라는데 기초를 두고 있다. 여기서 주의할 사항은 위에서의 논의가 mode I 부하에 대한 것이고 mode I 과 II의 복합인 경우에는 크랙끝의 변형상태를 결정하는데 두개의 파라미터를 요구한다⁽¹²⁾. 이에 대한 연구는 대체로 초기단계에 있으므로 더 좋은 실험방법의 제안이나 이론의 발달을 필요로 한다.

3. 파괴조건

이상에서 언급한 사항들은 크랙끝 부근의 역학적 해석으로부터 파괴를 예측하는데 목적이 있다. 그것은 크랙끝을 둘러싸는 영역에서의 변형상태가 크랙끝에서의 파괴과정을 제어할 것이라는 판단에서 비롯되고 정확한 파괴과정을 직접 알지 못하더라도 실험을 통해 그러한 제어파라미터의 임계값을 결정하자는 것이다. 이러한 방법을 巨視的 觀點에서의 파괴역학 연구이고 또다른 한편으로는 微視的 觀點에서의 연구가 있다. 이는 주로 금속학자들에 의해 파괴현상의 미시적 관찰을 토대로 실험적인 자료를 얻음으로써 이루어져 왔다. 불행하게도 이 두 연구가 대체로 독립된 상태에서 병렬적으로 이루어져오고 있다. 그러나 파괴역학 연구의 궁극적인 목

표는 미시와 거시의 조합된 해석을 요구하고 어느 한편 만의 해석은 그 성질상 완벽한 것이 될 수 없다. 예를 들면 거시적 觀點의 파괴역학은 실험결과에 의존해야 하고 또한 모든 상황에 따라 일관성 있는 실험자료를 얻는데 상당한 어려움이 있다. 미시적 觀點에서는 때때로 파괴과정의 정성적인 논의에 거치거나 혹은 체계적인 이론의 결여를 들 수 있다. 좀더 自足하고 완전한 해를 얻고자 하는 방법의 추구에서 몇몇 파괴조건이 제안되었다. 이는 해석적이나 수치적 방법을 통해 얻을 수 있는 크랙끝 부근의 역학적 해석을 사용하여 어떤 특정거리(characteristic distance)에서의 임계상태를 결정하는 것이다⁽⁹⁾. 임계상태에는 임계응력과 임계 스트레인이 있다. 전자의 적용은 mode I에서 기존 크랙방향으로 크랙성장을 예견하게 되고 후자의 경우는 크랙성장이 크랙평면에 경사진 방향으로 나가게 됨을 예견한다. 특정거리의 도입은 式(3)에서도 알 수 있는 바와 같이 r 이 아주 작으면 아주 작은 하중(J)에서도 파괴가 예측되기 때문이다. 그리고 그러한 임계값이 어떻게 결정되는 것이며 또한 부하 방법 시편모양에 따라 변하는 것인지에 대해서도 아직 논의가 계속되고 있다. 이 방법의 mode III에의 적용은 좋은 결과를 나타내고 있다⁽⁹⁾.

연성파괴에는 금속현미경을 사용한 파괴단면이나 표면의 조사를 통해 대체로 두 가지 형태가 있음을 알 수 있다. 첫째는 크랙이나 氣空들(voids)이 서로 확장하여 닿음으로써 그들의 연결단면이 없어지는 형태이다⁽⁹⁾. 여기서 기공이라 함은 원천적인 것과 금속에 존재하는 큰 입자(large inclusion)가 비교적 낮은 응력 혹은 스트레인에서 모체로부터 분리되어 생기는 기공이 있다. 예를들면 AISI 4340 혹은 고강도 강철에서 MnS 입자 軟鋸에서의 Fe_3C 입자 혹은 18 Ni200 Maraging Steel에서의 Ti(C, N) 입자를 들 수 있다. 두번째로 크랙이나 기공들의 연결단면은 슬립밴드(slip band)를 형성하고 이것의 국부적인 큰 스트레인으로 인해 아주 많은 작은 입자(small inclusion)에서 생긴 기공이 확장하여

여기서 G 는 전단탄성계수이고 k 는 전단항복 응력, ν 는 프와송비, ρ_s 는 기공의 중심과 중심간의 평균거리, f 는 입자의 체적비이다. 몇몇 재료에 대한 식(4)와 K_{Ic} 의 비교는 좋은 결과를 보여 주었다. 또한 정상적인 상태에서 크랙의 성장은 기공에서 기공으로 진행하며 진행각은 입자의 체적비에 따라 $\pm(25\sim 30)^\circ$ 가 된다. 예를들면 $f=1\%$ 일때 크랙성장을 크랙평면에 비추었을 때의 성장율은 COD에 대해 $dc/d\delta=3.56$ 이고 가장 결합되기 쉬운 기공의 위치는 $\pm 27^\circ$ 이다. 또한 COA는 최대가 32.3° 이며 입자의 체적비가 증가하면 감소한다. 어떤 임의의 순간에 크랙끝 근처에서 확장하고 있는 기공의 수를 계산할 수 있고 이는 실험에서의 관찰과 일치한다. 동일한 방법으로 항복규모에 제한이 없는 경우와 복합 mode인 경우에 대해서도 계산할 수 있다⁽¹⁶⁾.

참 고 문 헌

1. G.R. Irwin, Trans. ASME, J. Appl. Mech., 24, 361, 1957.
2. ASTM, Annual Book of ASTM Standards, Pt. 31, p. 911. 1970.

3. J.W. Hutchinson, J. Mech. Phys. Solids, 16, 13, 1968.
4. J.R. Rice and G.F. Rosengren, Ibid. 16, 1, 1968.
5. C.F. Shih, Ibid. 29, 305, 1981.
6. C.F. Shih and M.D. German, Int. J. Fracture, 17, 27, 1981.
7. R.M. McMeeking, J. Mech. Phys. Solids, 25, 357, 1977.
8. V. Vitek, Ibid, 24, 263, 1976.
9. F.A. McClintock, Fracture: An Advanced Treatise (H. Liebowitz, ed.) Vol. 3, Academic Press, 1971.
10. J.A. Begley and J.D. Landes, ASTM-STP-514, 1972.
11. P.C. Paris, et. al., ASTM-STP-668, 1979.
12. C.F. Shih, Ph. D. Dissertation, Harvard U. 1973.
13. J.W. Hancock and A.C. MacKenzie, J. Mech. Phys. Solids, 24, 147, 1976.
14. J.R. Rice and M.A. Johnson, Inelastic Behavior of Solids, (M.F. Kanninen et. al., ed.), McGraw-Hill, 1970.
15. I. Gu, Ph. D. Dissertation, Part II, MIT. 1982.
16. I. Gu and F.A. McClintock, to Appear in J. Mech. Phys. Solids

