

증기발생기 전열관에 존재하는 T-형 복합 균열의 파열압력 시험 및 해석

신규인* · 박재학** · 윤기봉†

*중앙대학교 미래신기술연구소 · **충북대학교 안전공학과 · 중앙대학교 기계공학부
(2005. 5. 11. 접수 / 2005. 6. 14. 채택)

Experimental and Analytical Study on the Burst Pressure of Steam Generator Tubes with T-type Combination Cracks

Kyu In Shin* · Jai Hak Park** · Kee Bong Yoon†

*Frontier Technology Innovation Center, Chung Ang University
**Department of Safety Engineering, Chungbuk National University
Department of Mechanical Engineering, Chung Ang University
(Received May 11, 2005 / Accepted June 14, 2005)

Abstract : Several nuclear power plants reported that they often found the combination cracks, which consist of longitudinal and circumferential cracks in the tubes. For the burst pressure of a tube with a single longitudinal or circumferential crack, several experimental equations have been proposed in published literatures. But for the combination crack appropriate fracture criterion has not been proposed yet. In this study the burst pressures of a tube with a longitudinal crack or a T-type combination crack consisting of longitudinal and circumferential cracks were obtained experimentally and analytically. Fracture parameters such as crack opening angle (*COA*) were investigated by using elastic plastic analysis. Also the burst pressure for a T-type combination crack located near a tubesheet was considered to develop a length-based criterion. Because most of the axial, circumferential or combination cracks initiate in roll transition zone near the tubesheet.

Key Words : combination crack, longitudinal crack, circumferential crack, burst pressure, crack opening angle(*COA*), elastic plastic analysis

1. 서 론

일반적으로 전열관의 파열은 전열관 내·외부에서 발생하는 응력부식균열, 피로 그리고 마멸 등의 원인에 의해서 발생되며 파열 발생 부위는 전열관의 관판(tubesheet) 상단 부분, 환관천이지역(kiss roll transition region) 그리고 U-굽힘부 등인 것으로 알려져 있으나 하부 지지대 근처에서 발생한 것이 보고되기도 한다.

초기 발전소에서는 축방향균열에 국한하여 관심을 가졌었으나, 최근 원주방향균열에 의한 사고가

발생되면서 원주방향균열에 대해서도 관심을 가지게 되었다. 현장에서 보고되는 원주방향균열은 축방향균열의 영향 없이 생성되거나 축방향균열로부터 발전되어 생기는 것으로 보고되고 있다¹⁾.

일반적으로 전열관의 건정성을 유지하기 위해서는 전열관의 파열압력이 정상 가동압력의 3배 또는 설계기준 압력의 1.4배를 유지해야 한다. 이는 정상 가동 중 또는 설계기준사고가 발생하였을 때 결합 전열관이 존재하더라도 전열관의 파단 사고나 과도한 누설을 방지하기 위함이다.

그러나 단일 축방향 또는 원주방향균열이 존재하는 전열관에 대한 파열압력은 여러 문헌에 연구, 발표되어 왔으나 축/원주방향균열이 함께 이루어진 복합균열에 대한 연구는 아직 거의 없는 실정이다.

† To whom correspondence should be addressed.
kbyoon@cau.ac.kr

Emery 등²⁾은 링-모델(ring-model)을 제안하여 축방향균열의 생성을 살펴보고 균열성장속도 계산에 적용할 수 있음을 보여주었다. Park 등³⁾은 증기발생기 전열관의 환관천이부위에 존재하는 축방향 관통균열에 대하여 관막음 기준에 관한 연구를 수행하였다. 또한 신규인 등⁴⁾은 전열관에 존재하는 단일 축방향균열과 T-형의 복합균열에 대하여 응력강도계수(K)를 이용한 탄성해석 결과와 COA(crack opening angle)를 이용한 탄소성해석 결과가 잘 일치함을 보여주었다.

본 논문에서는 증기발생기 전열관에 존재하는 단일 축방향균열과 축/원주방향이 함께 존재하는 T-형 복합균열을 대상으로 EPRI 지침서^{7,9)}에 준하여 파열압력 시험을 행하였다. 그리고 탄소성해석을 행하여 단일 축방향균열에 대한 파열압력에서의 임계 COA인 COA_c 를 구하고 이를 매개변수로 사용하여 T-형 복합균열에서의 파열압력식을 제시하였다.

또한 판관이 파열압력에 주는 영향에 대해서도 살펴보기 위하여 축/원주방향의 복합균열에서 축방향균열 선단으로부터 1.0mm되는 지점에 판관을 위치시킨 경우(TS-T_L type)와 원주방향균열의 한쪽 선단에 판관을 위치시킨 경우(TS-T_C type)의 두 가지 경우에 대하여 파열압력곡선과 파열압력식을 함께 구하였다.

2. 파열압력 해석 및 시험

2.1. 탄소성해석 방법 및 모델

단일 축방향균열에 대한 파열압력 식을 복합균열에 적용하기 위해서는 적절한 매개변수를 선택하여야 한다. 본 해석에서는 유한요소해석으로부터 구해진 COA를 매개변수로 사용하였다. COA 정의는 Fig. 1과 같다. 탄소성해석 시 COA는 간접적으로 파괴 진행역에서의 변형의 크기를 알려주므로 주어진 균열길이에 대하여 동일한 COA 값을 가진다면 균열선단의 변형상태가 동일하다고 할 수 있다⁵⁾.

원통형 구조물에 존재하는 복합균열의 경우 벌징 현상과 복합 모드 하중의 영향으로 길이방향 변위 u_z 와 반경방향 변위 u_r 이 원주방향 변위 u_θ 와 함께 발생된다.

그러나 단일 축방향균열과 T-형 복합균열에 대한 탄소성해석 결과 균열선단인 A점과 균열면 상의 첫 번째 모서리 절점인 B점과의 u_r 의 차이는 u_θ

에 비하여 매우 작게 나타나 COA 해석 시 변위 u_θ 만을 고려하였다.

또한 COA의 크기는 유한요소해석에서 사용되는 균열선단 근처의 요소 크기에 따라 달라진다. 이에 본 해석에서는 8 절점 쉘 요소(shell element)를 사용하였으며, 균열 선단부에서는 길이 0.1mm, 높이 0.1mm가 되도록 하였다. COA 계산 시 균열 선단으로부터 0.1mm에 위치하는 모서리 절점에서의 변위로부터 구하였다.

복합균열에서의 파열압력을 구하는 방법은 다음과 같다. 첫째 길이가 L 인 단일 축방향균열이 존재하는 전열관에 대하여 EPRI^{6,7,9)}에서 제안된 전열관의 파열압력 식 (1)으로부터 구한 파열압력(P)과 축방향 응력($Pr/2t$)을 함께 고려하여 탄소성해석을 행한다.

$$P_N = 0.0613 + 0.536 \exp(-0.278 \lambda) \quad (1)$$

여기서

$$P_N = \frac{Pr}{(\sigma_{ys} + \sigma_u)t}, \lambda = \frac{L}{\sqrt{rt}} \quad (2)$$

이고, σ_{ys} 는 전열관의 항복강도, σ_u 는 인장강도, r 은 전열관의 공칭반경, t 는 전열관의 두께 그리고 L 은 축방향 균열길이이다.

해석 시 상용 프로그램인 ANSYS(V. 7.0)를 이용하였으며, 파열압력을 전열관 내에 적용 할 때 10 단계로 나누어 1 단계부터 단계적으로 압력을 증가시켜 최종적으로 10 단계에서 파열압력에 도달하도록 하였다. 잔류응력이나 열응력은 해석에서 고려하지 않았다.

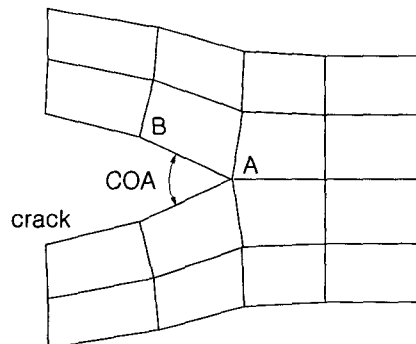


Fig. 1. Definition of COA

둘째, 탄소성해석을 행한 후 파열압력에서의 COA를 구한다. 이때 얻은 COA 값이 주어진 균열 길이에 대한 임계 COA 즉 COA_c가 된다.

셋째, 해석 대상의 복합균열에 대한 유한요소 모델을 형성한 후 예상되는 파열압력을 외부하중으로 가하여 각 하중 단계에서의 COA를 구하여 하중-COA 곡선을 얻는다. 이로부터 동일한 축방향균열 길이에서의 COA_c에 해당하는 압력을 구한다. 이 압력이 복합균열에서의 파열압력이 된다.

해석 시 재료의 변형 특성은 식 (3)의 응력-변형을 관계식을 이용하였으며, 재료의 기계적성질은 Table 1에 나타내었다.

$$\sigma = K\epsilon^n \quad (3)$$

복합균열이 존재하는 전열관 모델은 Fig. 2에 나타내었으며, 전열관의 공칭 직경은 21.33mm, 두께는 1.27mm, 그리고 전열관의 길이는 200.0mm로 하였다. 모델 형성시 축방향균열은 0°에 위치시킨 대칭 조건을 이용하여 전체 모델 형상에서 1/2만 나타내도록 하였다.

2.2. 파열압력시험

전열관의 파열압력 시험은 관 내부에 작용하는 유체의 압력을 일정한 속도로 상승시켜 전열관이 파열되는 순간의 압력을 측정하는 시험이다. 측정된 파열압력은 실제 증기발생기에서 결합 전열관이 지탱할 수 있는 최대압력 즉 파단 조건이 된다.

그러나 관통 균열이 존재하는 전열관은 파열되기 전에 유압 작동유의 누설이 먼저 일어난다. 이에 EPRI 지침서^{6,7)}에서는 Fig. 2에서와 같이 두께 2~4mm의 호스를 사용하고, 보강박판(reinforcing foil)으로 두께 0.1~0.2mm, 폭 10~12mm의 황동 또는 구리 박판 등을 사용하도록 권고하고 있다.

시험 시 보강 박판을 사용하면 측정되는 파열압력은 전열관의 실제 파열압력보다 높아지므로 이를 보정하기 위하여 EPRI 지침서에 따라 측정된 파열압력의 95%를 전열관의 파열압력으로 취하였다.

T-형 복합균열시험을 행하기 이전에 단일 축방향균열에 대하여 시험을 행하였다. 시험 시편은 증기발생기 전열관에 사용되는 Inconel 600으로 외경 22.21mm, 두께 1.27mm 그리고 길이 250mm이며 균열은 폭 0.2~0.3mm의 방전 가공기(electro-discharge machine, EDM)로 가공하였으며 전열관 시편의 길

이 중간에 위치하도록 하였다.

Fig. 4는 단일 축방향균열에 대한 파열압력 시험 결과를 기존의 시험 결과⁸⁻¹⁰⁾와 식 (3)의 단일 축방향균열에 대한 파열압력을 함께 나타낸 그림이다. 그림에서 보면 축방향균열에 대한 파열압력 시험 결과가 선행 시험 결과⁸⁻¹⁰⁾와 잘 일치함을 알 수 있었다.

Table 1. Material properties of Inconel 600 for burst pressure analysis

Temperature (°C)	σ_y (MPa)	σ_{ur} (MPa)	K (MPa)	n
20	314.0	698.0	3266.13	0.36

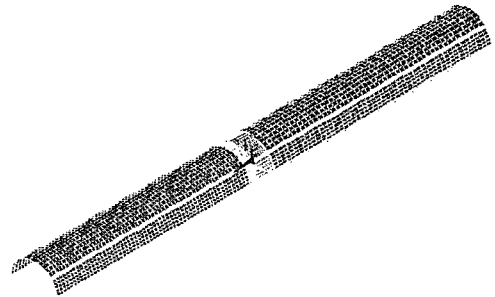


Fig. 2. Shell element model of a tube with a T-type combination crack (L = 9mm, 2C = 90°)

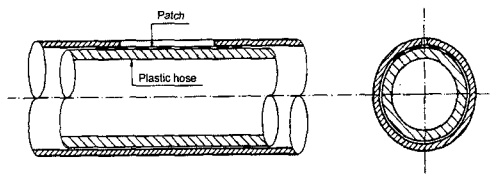


Fig. 3. Schematic diagram of a cracked tube with patch and plastic hose for protecting leakage

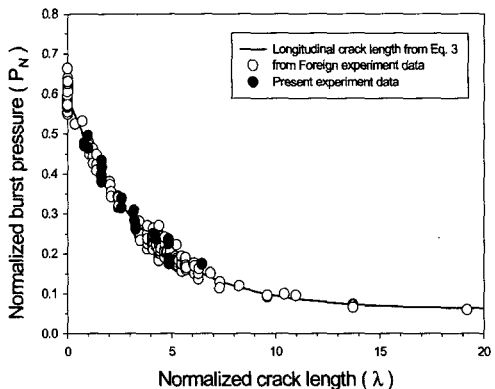


Fig. 4. Burst pressure for a tube with a single longitudinal crack

3. 파열압력 시험 및 해석 결과

T-형 복합균열에 대한 파열압력을 추정하기 위해서 Fig. 5와 같이 축방향균열과 원주방향균열과의 파열압력 관계를 살펴보았다. 이때 원주방향 관통균열이 존재하는 경우의 파열압력은 식 (4)과 같다.

$$(P)_C = \frac{4rt\sigma_F}{\pi r_i^2} \left\{ \frac{\pi - \theta}{2} - \arcsin\left(\frac{\sin\theta}{2}\right) \right\} \quad (4)$$

여기서 r_i 는 관의 내부 반경, σ_F 는 유동응력(flow stress) 그리고 원주방향균열 길이는 원주각으로 2θ (degree)이다.

그림에서 보면 원주방향균열길이가 짧은 경우 전열관의 파열은 축방향균열에 의해 파열되지만, 원주방향균열이 긴 경우에는 원주방향균열이 전열관 파열의 주원인인 것을 알 수 있다.

이로부터 전열관에 존재하는 T-형 복합균열에 대한 시험 결과와 탄소성해석 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 탄소성해석의 경우 6~18mm의 축방향균열 길이에 대하여 각각의 축방향균열의 한쪽 끝을 중심으로 원주방향균열 길이(2θ) 45°, 60°, 90° 그리고 120°가 존재한다고 가정하였다.

그림에서 파열압력 시험 결과를 살펴보면 원주방향균열길이가 길어질수록 파열압력은 떨어지고, 탄소성해석으로부터 구한 파열압력이 파열압력 시험결과보다 낮은 보수적인 결과를 보여주었다. 또한 동일한 축방향균열길이에서 파열압력은 원주방향균열의 영향으로 원주방향균열길이가 길어질수록 떨어지는 것을 알 수 있었다.

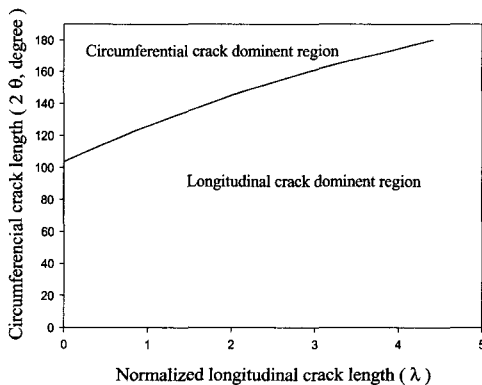


Fig. 5. Comparison of burst pressure between longitudinal and circumferential cracks

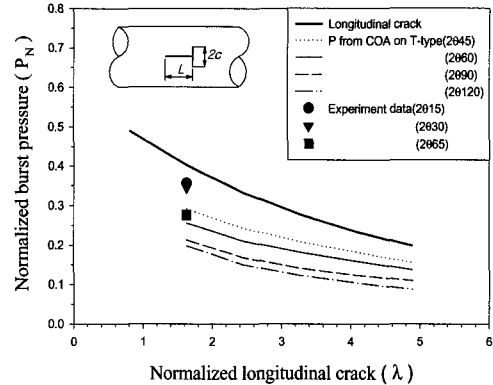


Fig. 6. Comparison of burst pressure between T-type and longitudinal cracks

Fig. 6의 파열압력곡선으로부터 T-형 복합균열의 파열압력식을 다음과 같이 구하였다. T-형 복합균열의 파열압력($(P_N)_T$)은 단일 축방향균열에서의 파열압력과 원주방향균열에서의 파열압력의 관계로부터 다음의 식 (5)와 같이 표현될 수 있다.

$$(P_N)_T = (P_N)_L \times f(\theta) \quad (5)$$

여기서 $(P_N)_L$ 은 단일 축방향균열에서의 파열압력 그리고 $f(\theta)$ 은 원주방향균열의 크기에 따른 수정계수이다.

이로부터 $f(\theta)$ 는 Fig. 7과 같이 나타낼 수 있으며 외삽법에 의하여 식 (5)와 같이 표현될 수 있다.

$$f(\theta) = 1.0 - 6.738 \times 10^{-3} (2\theta) + 1.7362 \times 10^{-5} (2\theta)^2 \quad (6)$$

Fig. 8은 T-형 복합균열에서 관관을 고려한 경우의 파열압력 결과로 관관이 없는 경우와 단일축방향 균열의 경우와 함께 비교하였다. 관관을 고려한 경우를 살펴보면 축방향균열 선단으로부터 1.0mm 되는 지점에 관관을 위치시킨 경우(TS-T_L)의 파열압력이 원주방향균열의 한쪽 선단으로부터 관관이 존재한다고 가정한 경우(TS-T_C)의 파열압력보다 높은 것을 알 수 있다.

Fig. 8 (a)의 TS-T_L에서 원주방향균열이 60°인 경우를 살펴보면 축방향균열길이가 짧을 때는 관관의 영향으로 인하여 단일 축방향균열의 파열압력보다 높게 나타났지만, 축방향 균열 길이가 길어

질수록 단일 축방향균열의 파열압력과 거의 없게 나타났다. 그러나 원주방향균열이 길어진 경우(120°)에는 원주 방향 균열에 의하여 파열압력은 낮아졌지만, 관판이 없는 경우의 파열압력보다는 높게 나타났다.

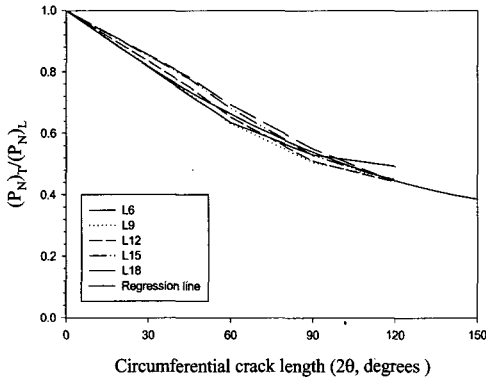
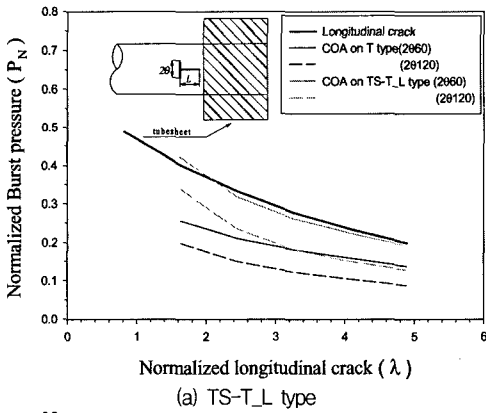
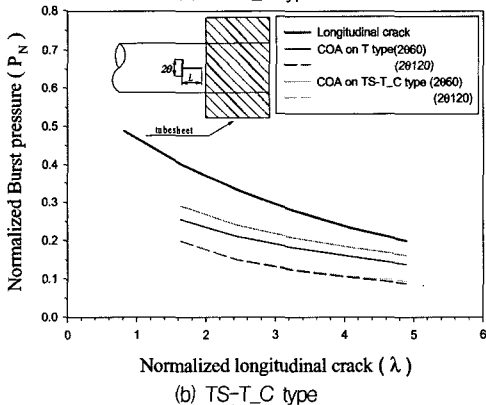


Fig. 7. Comparison of circumferential crack length and normalized burst pressure of T-type over longitudinal cracks.



(a) TS-T_L type



(b) TS-T_C type

Fig. 8. Comparison of burst pressure between T-type with and without tubesheet and longitudinal cracks.

Fig. 8 (b)의 TS-T_C type의 경우 원주방향균열이 60°일 때는 관판이 없는 경우의 파열압력보다 높게 나타났지만, 원주방향균열이 120°로 길어진 경우에는 원주방향균열의 영향으로 관판의 효과는 없어져 관판이 없는 경우의 파열압력과 같아짐을 알 수 있다.

두 결과로부터 관판을 고려한 경우의 파열압력식은 다음과 같이 얻을 수 있다.

TS-T_L의 경우는

$$f(\theta) = 1.0 - 1.6657 \times 10^{-3}(2\theta) - 3.4800 \times 10^{-5}(2\theta)^2 \quad (7)$$

이고 TS-T_C의 경우는 다음과 같다.

$$f(\theta) = 1.0 - 3.6526 \times 10^{-3}(2\theta) - 6.5890 \times 10^{-6}(2\theta)^2 \quad (8)$$

4. 결론

단일 축방향균열과 T-형 복합균열이 존재하는 전열관에 대하여 EPRI 지침서에 따라 파열압력 시험을 행하였다. 그리고 단일 축방향균열과 T-형 복합균열이 존재하는 전열관에 대하여 탄소성해석을 행하여 축방향 단일 균열에 대한 파열압력에서의 COA_C를 구하고 이를 매개변수로 사용하여 복합균열이 존재하는 전열관에서의 파열압력을 추정하는 방법을 제시하였으며, T-형 복합균열에서의 파열압력식을 구하였다.

1) 단일 축방향균열에 대한 파열압력 시험 결과는 기존의 시험 결과와 전열관의 파열압력 식으로부터 구한 파열압력 결과와 잘 일치하였다.

2) 전열관에 존재하는 T-형 복합균열에 대한 탄소성해석 결과 동일한 축방향균열길이에서 원주방향균열길이가 길어질수록 파열압력소하였으며 파열압력식을 이용하여 T-형 복합균열에 대한 파열압력을 얻을 수 있음을 보여주었다.

3) 관판이 존재하는 T-형 복합균열의 경우에는 축방향균열 선단으로부터 1.0mm되는 지점에 관판을 위치시킨 경우의 파열압력주방향균열의 한쪽 선단으로부터 관판이 존재한다고 가정한 경우의 파열압력이 높았으며, 관판을 고려한 경우에 대한 파열압력을 얻을 수 있음을 보여주었다.

이러한 결과로부터 축/원주방향균열이 함께 존재하는 T-형 복합균열의 경우 본 논문에서 수행된 탄소성해석을 이용한 파열압력해석 결과와 파열압력식은 증기발생기 전열관의 건전성 평가에 이용될 수 있음을 보여주었다.

감사의 글 : 이 논문은 2005년도 중앙대학교 박사후연수과정(Post-Doc)지원사업에 의한 것으로써 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) P. E. McDonald, V. N. Shah, L. W. Ward, and P. G. Ellison, "Steam Generator Tube Failures", NUREG CR-6365, 1996.
- 2) A. F. Emery, M. Perl, W. J. Love and A. S. Kobayashi, "On the Motion of an Axial Through Crack In a Pipe", Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 103, pp. 281~286, 1981.
- 3) M. K. Park, Y. J. Kim, J. H. Jheon, J. M. Kim, and J. S. Park, "Study on Plugging Criteria for Thru-wall Axial Crack in Roll Transition Zone of Steam Generator Tube", Transactions of KSME A, Vol. 20, No. 9, pp. 2894~2900, 1996.
- 4) 신규인, 박재학, 김홍덕, 정한섭, "복합 균열이 존재하는 증기발생기 전열관에서의 파열 압력 해석", 산업안전학회 추계학술발표회, pp. 13~18, 2002.
- 5) C. F. Shih, H. G. deLorenzi and W. R. Andrews, "Studies on Crack Initiation and Stable Crack Growth", ASTM STP 668, pp. 65~120, 1979.
- 6) EPRI TR-107569-V1R5, "PWR Steam Generator Examination Guidelines: Revision 5", 1997.
- 7) EPRI TR-107620, "Steam Generator in Situ Pressure Test Guidelines", 1998.
- 8) H. S. Chung, K. T. Kim and H. D. Kim, "A Study on the Integrity Assessment of Defected S/G Tube", KEPRI TR.96NJ14, 2000.
- 9) EPRI NP-6865-L, "Steam Generator Tube Integrity, Volume 1 : Burst test results and validation of rupture criteria", 1991.
- 10) EPRI NP-7474, "Evaluation of Leak and Burst Characteristics of Roll Transitions Containing Primary Water Stress Corrosion Cracks", 1993.