

고온 후육부 균열전파 평가 프로그램의 개발

김건영 · 강명수 · 송기욱

Development of Program for Crack Growth Analysis of Thick Section Components Exposed at High Temperature

Kun-Young Kim, Myung-Soo Kang and Gee-Wuk Song



- 김건영 (한전 기술연구원)
- 1945년생
- 파괴공학을 전공하였으며, 기계설비 및 구조물의 파괴해석, 상태진단, 수명예측 등 수명평가 기술에 관심을 가지고 있다.



- 강명수 (한전 기술연구원)
- 1962년생
- 파괴역학을 전공하였으며, 열피로크랙전파 거동 및 고온설비의 수명예측 등에 관심을 가지고 있다.



- 송기욱 (한전 기술연구원)
- 1964년생
- 파괴역학을 전공하였으며, 재료의 경년열화 평가법 및 고온피로파괴 분야에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

1.1 ROTBOIL 개발의 배경

본 ROTBOIL (Rotor and Boiler Lifetime Prediction) 프로그램은 화력발전소의 대형 고온고압 설비인 터빈로터와 보일러의 헤더 및 주증기관에 균열이 존재할 경우 기동-정상운전-정지 등의 운전조건에 따른 피로나 크리프에 의한 균열전파 평가 프로그램으로 발전소의 수명예측을 가능하게 하여 준다. 터빈로터의 수명예측 프로그램은 표면 및 내측균열을 대상으로, 보일러 헤더의 수명예측은 헤더와 스택트 튜브와의 연계 부분에서의 균열전파 해석을 수행할 수 있도록 프로그램

을 작성하였다. 이 글에서는 터빈로터의 내부인 보어(bore)에 대하여 기술한다.

— ROTBOIL 프로그램의 기본 설계방향

- (1) 프로그램의 각 부분을 모듈화(modulization)하여 확장성, 호환성을 유지할 수 있도록 함으로써 손쉽게 새 연구결과가 반영되도록 한다.
- (2) 외부 데이터나 프로그램과의 연계(Interface)부분을 용이하게 구성하여 앞으로 필요한 연구결과를 쉽게 수용할 수 있도록 한다.

1.2 ROTBOIL의 구성도

그림 1에 ROTBOIL 프로그램의 기본구조를 나타냈다. ROTBOIL은 메뉴 형태의 사

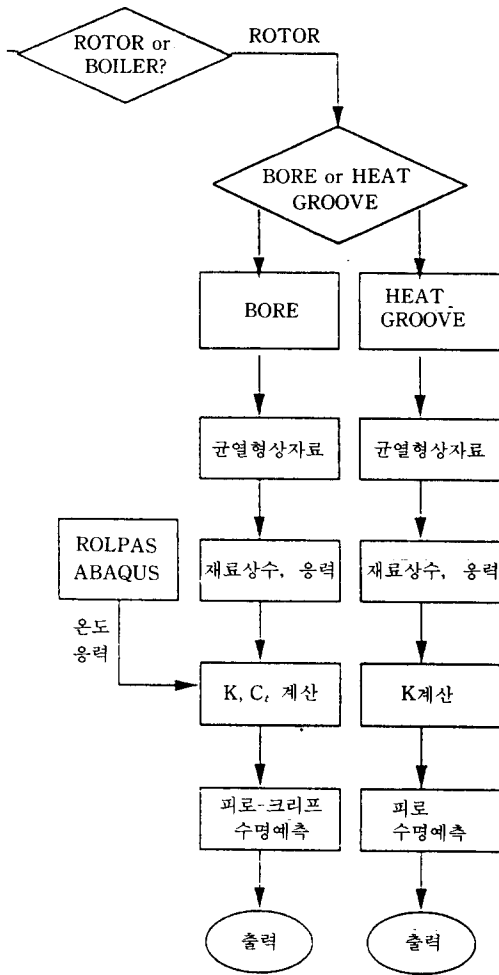


그림 1 ROTBOIL 프로그램의 구성도

용자 연계 (user interface) 방식으로 구성되어 있어 프로그램에서 요구하는 번호나 수치를 입력하면 내부에서 계산을 수행한 후 결과를 출력한다.

터빈로터의 수명평가 해석을 위한 ROT-BOIL 프로그램의 보어 부분에서 균열형상 자료나 재료상수를 읽은 후의 보다 상세한 흐름도는 그림 2에 나타나 있다. 화일에 저장된 ROLPAS나 ABAQUS의 해석 데이터 중에서 균열전파 해석에 필요한 부분만을 읽

은 후 입력된 균열 형상이나 재료상수를 이용하여 응력집중계수를 구한다. 이 응력집중계수가 파괴인성보다 크면 이 균열은 성장하여 파괴되어진다고 가정하고, 그렇지 않은 경우는 Paris식에 의하여 균열길이의 증가량을 계산한 후 Ligament 파괴 여부를 판단하여 새로운 균열길이를 정하여 다시 응력집중계수를 계산하고, 이를 파괴인성과 비교하여 파괴 여부를 결정하는데 파괴에 도달할 때까지 계속 이 과정을 반복한다.

1.3 ROTBOIL의 특성

현재 개발된 ROTBOIL 프로그램의 특성은 다음과 같다(터빈로터).

- (1) 외부 응력은 일정한 주기로 반복되며, 그 크기는 변화하지 않는다.
- (2) 열응력에 의한 응력장은 유한요소 코드인 ROLPAS나 ABAQUS를 이용하여 계산한다.
- (3) 응력집중계수(K_I)는 기개발된 프로그램의 이론식을 이용하여 계산한다.

2. 터빈로터에서의 수명예측

2.1 보어 부위에서의 수명예측

2.1.1 개요

터빈로터의 보어 부위에서는 비금속 개재물의 석출, 주조결함, 단조효과 불충분, mass 효과 등에 의해 이미 임의의 크기 a_i 라는 균열이 존재하는 것으로 간주하여, 이 균열이 파단을 가져오는 임계균열 길이 a_c 에 도달될 때까지 소요되는 시간을 터빈로터의 수명으로 평가한다. 실제의 경우는 NDT로 균열의 크기 및 위치를 확인한다. 보어 부위에서의 균열전파는 저주기 피로와 휴지기간 (hold time) 동안의 크리프에 의하여 진행된다고 가정하고 피로-크리프 상호작용을 고려하지 않는다. 로터 재료로 쓰이는 1CrMoV

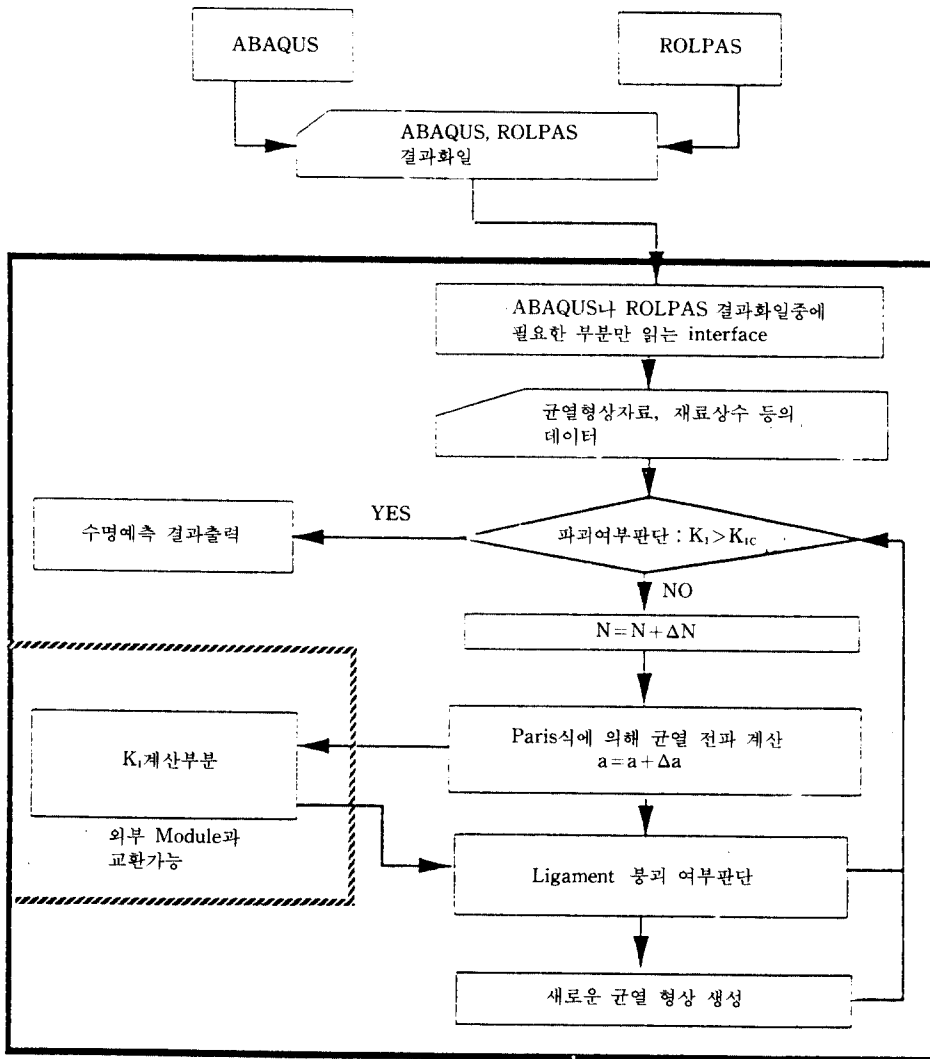


그림 2 ROTBOIL의 터빈로터 수명예측의 상세흐름도

강은 크리프완화(creep relaxation)효과가 적으므로, 그 효과를 무시한다. 그리고, 모든 운전조건에서의 최고 허용응력으로 가혹한 냉기 기동시 운전조건으로 산출한 최대 열응력을 사용한다. 이는 운전유형이 변화하더라도 최대 열응력은 허용응력 크기 이하로 발생되며, 운전유형의 차이는 단지 정상상태까지 도달되는 시간이 다르다고 간주하기 때문이다.

2.1.2 피로균열전파

보어부의 피로균열 전파식에는 앞에서 소개된 Paris식이 이용된다. 즉, 균열의 초기 길이 a_i 를 가정하고 균열길이를 증분시켜 가면서 균열길이에 따른 응력집중계수의 증분 ΔK_n 과 균열전파 속도의 증분 Δa_n 을 계산하여 균열 증분에 해당하는 수명증분 ΔN 을 누적해가면서 응력집중계수 K 가 파괴인성 K_{Ic} 에 도달할 때까지 이 과정을 반복한다.

응력은 보어에서의 최대 응력을 사용하고, 온도는 로터 표면부에서의 최대온도를 사용한다. 온도에 따라 변하는 Paris상수 C , m 도 로터 표면부에서의 최고 온도일 때의 값을 사용한다. 이는 수명예측시 보다 안전한 결과를 가져온다.

2.1.3 크리프-피로 상호작용을 고려한 균열전파

터빈로터는 저주기피로와 정상운전 기간에 따른 크리프 손상을 받는다. 그림 3은 1회 기동시에 로터 보어부분에 있는 균열이 받는 응력이력도이다. 다음 식은 Saxena가 휴지기간을 포함하는 일회 기동정지시의 균열전파량을 피로와 크리프의 영향을 합하여 계산한 식이다.

$$\Delta a = \left(\frac{da}{dN} \right)_0 + C_2 K^{2m} (t_h)^{1-m} + C_3 (C^*)^m t_h \quad (1)$$

$$\frac{da}{dN} = C_1 (\Delta K)^n + C_2 K^{2m} (t_h)^{1-m} + C_3 (C^*)^m t_h \quad (2)$$

여기서, C_1, C_2, C_3, n, m 은 실험이나 도표에서 구할 수 있는 상수들이며, t_h 는 휴지기간이다. C_1 과 n 은 Paris 상수이고, C_3 와 m 은 크리프 균열전파 상수와 지수이다. 즉, 다음 식에서 사용되는 상수와 지수이다.

$$\frac{da}{dN} = C_3 (C^*)^m \quad (3)$$

C_2 의 값은 5.0^{-7} 으로 불변의 값이다. 위의 식 (1)과 식 (2)에서 우변의 첫번째 항은 저주기피로 응력에 의한 균열전파량이고 두번째 항은 소규모 크리프 상태에 대한 균열전파량이며, 세번째 항은 안정적 크리프 상태에 대한 균열전파량이다. 과도적 크리프 상태는 휴지기간에 의해 소규모 크리프 상태와 안정적 크리프 상태의 영향을 고려하여 표현된다. 이때 C 는 응력의 함수로 터빈로

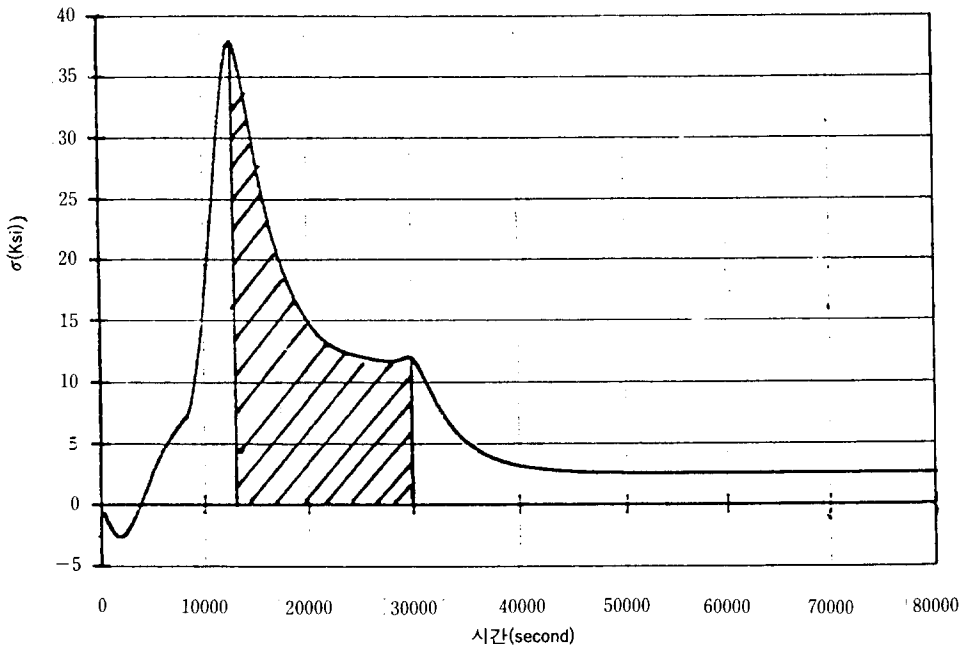


그림 3 터빈로터의 운전시 시간에 따른 응력변화

터에 대해 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$C^* = 0.006489e^{-63600/T} \sigma^{11.5} a \quad (4)$$

사용된 응력은 정상운전시에 보어쪽의 균열 위치에서의 응력이고, 온도는 로터표면에서의 온도이다.

위의 식 (3)과 식 (4)에서는 그림 3에 나타나 있는 빗선부분의 응력이완효과(stress relaxation effect)를 무시하고 있으나, 실제로는 이 부분의 영향이 지대한 것으로 보고되고 있다. 본 연구에서는 이 부분의 영향을 고려하여 균열전파 속도를 계산한다. 즉, 시간에 따른 응력의 감소를 고려하면서 균열주변이 소규모 크리프 상태에 있는 것으로 가정하여 소규모 크리프 상태에 의한 균열전파량을 계산하여 기존의 식에 합해준다. 피로-크리프 상호작용효과는 아직 많은 연구가 진행중이며, EPRI가 개발한 SAFER에서는 아직 채용하고 있지 않다.

2.2 ROTBOIL의 입력 및 기능

2.2.1 ROTBOIL의 입력자료

터빈로터의 운전조건 및 형상, 경계조건은 ROLPAS나 ABAQUS 실행시 입력된다. ROLPAS나 ABAQUS의 계산결과로부터는 다음과 같은 데이터가 ROTBOIL의 입력으로 필요하다.

- 크리프 계수 및 지수 (온도에 따른 값) : A, n
- 크리프균열 전파계수 및 지수 (온도에

따른 값) : B, q

- 휴지기간 : t_h
- 각 시간대별 응력분포
- 각 시간대별 온도분포

2.2.2 ROTBOIL의 기능

- Paris식에 의하여 로터의 수명(운전 횟수)을 예측한다.
- 내부 균열이 표면에 가까워지면, 리가먼트의 파괴여부를 결정한다.
- 응력집중계수 K_t 이 파괴인성 K_{Ic} 를 초과할때 로터의 수명은 끝난 것으로 본다.
- 휴지기간에 의한 크리프효과를 고려하여 수명을 예측한다.
- 균열의 위치가 주어지면 ROLPAS, ABAQUS 프로그램의 열응력해석 결과 화일에서 균열위치의 최대 열응력과 그때의 온도를 구한다.
- 취급된 5가지의 재료가 데이터베이스로 입력되어 있으므로 수명예측에 필요한 재료 특성을 얻을 수 있다.

3. 발전소의 적용사례

3.1 고압 터빈로터 보어의 수명예측

고압 터빈로터의 열피로만에 의한 균열전파를 수명예측하였다. 수명예측시 열응력계산은 ROLPAS를 사용하였다. 그림 4는 고압 터빈로터의 유한요소 모델이며, 냉기 기

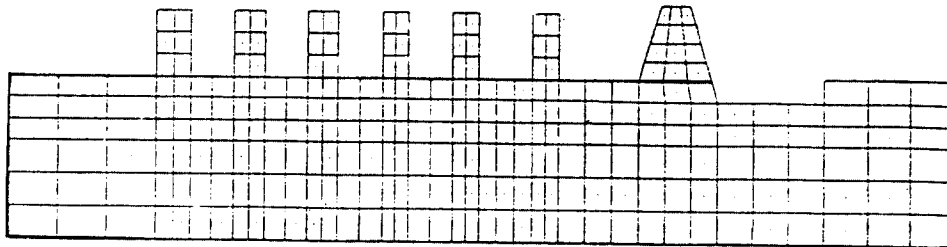


그림 4 터빈로터의 ROLPAS 유한요소모델 (평택화력 고압터빈로터)

Stress VS Time in Pyungtaeck(HP BORE)

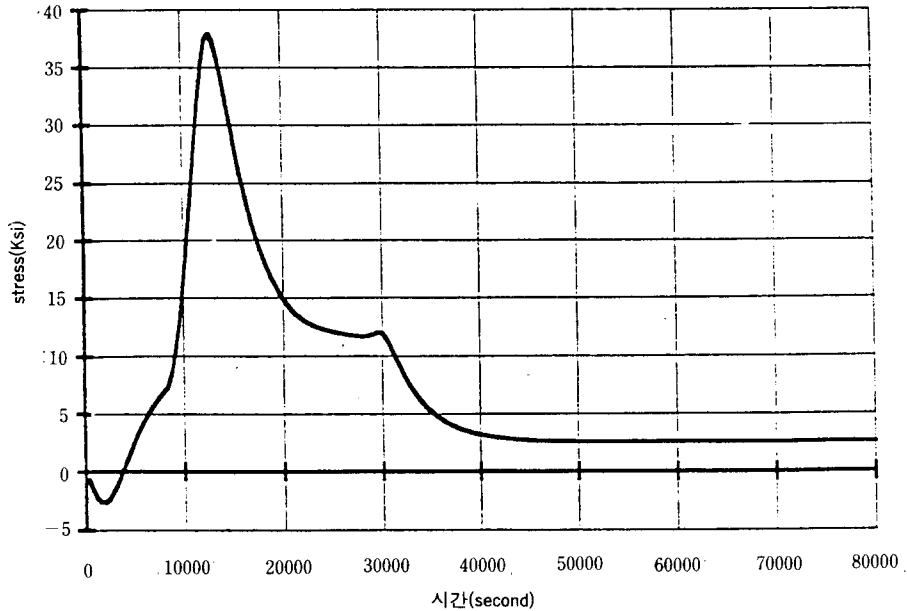


그림 5 시간에 따른 열응력이력 (평택화력 고압터빈로터)

동조건하에서, 1단 밑에 직경이 0.2in이고 리가먼트 길이가 0.9in인 내부균열이 존재한다고 가정하면, 이 균열에 작용하는 응력이력은 그림 5와 같다. 기동 후 12,800초 후에 최대 열응력이 31.5ksi가 되고, 그 때의 온도는 284.5°F이다.

균열의 초기위치와 크기는 표 1에, 터빈로터 재료상수 및 온도는 표 2에 정리되어 있다. 파괴인성과 항복응력은 온도의 함수로서 최대응력 발생 시점에서의 온도를 사용하고, 균열전파식에 사용하는 Paris 상수들은 정격 주중기온도(1050°F)에서의 값을 사용한다. 이는 수명예측 결과를 안전측으로 이끄는 반면에, 장기간 운전에서 터빈로터 재료열화 등의 비안전 특성을 고려할 때 적절한 것으로 보인다. 보어 부분에서의 열구배에 의한 원주방향 열응력은 기동조건에 따라 큰 변화가 없으므로 냉기기동을 기준 기동조건으로 하여 수명예측을 유도하였다.

이 예제의 경우 균열에서의 최대 피로응력은 44.0ksi로 이중 열구배에 의한 응력은 31.5ksi이고, 나머지는 원심력에 의한 응력이다. 이 응력하에서는 초기 균열길이 0.2in인 균열이 성장하여 1.0in가 되면 균열과 보

표 1 균열위치와 크기(평택화력 고압터빈로터)

| 구분 | 부호 | 단위 | 값 | 비고 |
|----------|-----------|----|--------|------|
| 균열형태 | | | | 내부균열 |
| 보어크기 | r_b | in | 1.634 | |
| 최소 z좌표 | z_{min} | in | 19.087 | |
| 최대 z좌표 | z_{max} | in | 98.886 | |
| 균열의 r좌표 | r_c | in | 2.634 | |
| 균열의 z좌표 | z_c | in | 76.600 | |
| 초기균열의 직경 | a_o | in | 0.200 | |
| 리가먼트 | z_l | in | 0.900 | |

표 2 재료상수와 최대열응력 (평택화력 고압터빈로터)

| 구분 | 부호 | 단위 | 값 | 비고 |
|----------------|------------|------------------------------|--------------|--------|
| 재료명 | | | | 1CrMoV |
| 균열선단에서의 최대응력 | σ_e | ksi | 31.540 | |
| 최대응력에서의 온도 | T | °F | 284.491 | |
| 파리스 계수 | C | in^{35}/kg | 0.657000E-08 | |
| 파리스 지수 | m | | 2.350 | |
| 항복응력 | σ_y | ksi | 86.490 | |
| 파괴인성 | K_{IC} | $\text{ksi}\sqrt{\text{in}}$ | 106.191 | |
| 한계력 (theshold) | T | $\text{ksi}\sqrt{\text{in}}$ | 5.000 | |
| 영률 | E | ksi | 25964.607 | |
| 프와송비 | ν | | 0.300 | |

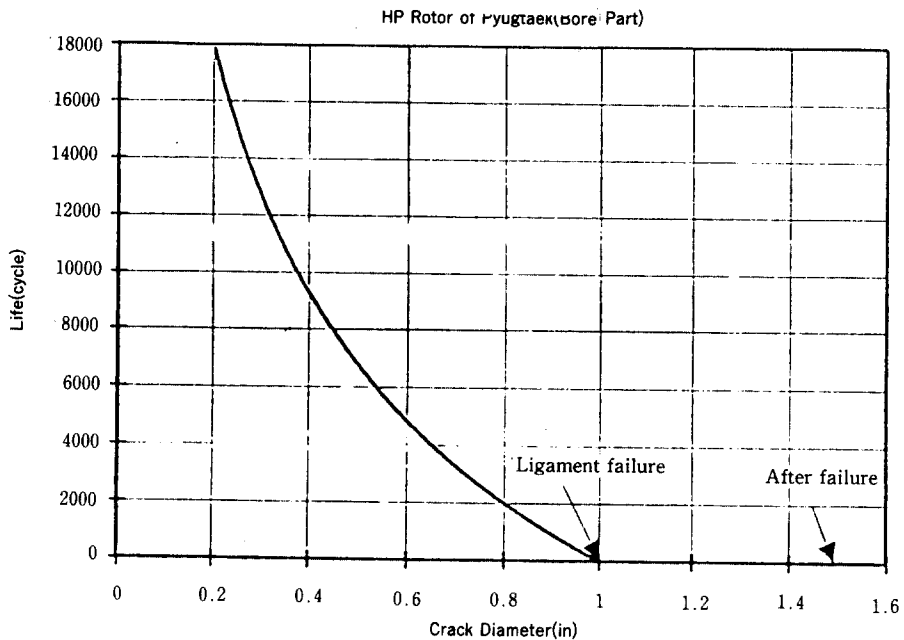


그림 6 균열전파에 따른 잔존수명 (평택화력고압터빈로터)

아표면 사이의 리가멘트가 파단되면서 표면 이른다. (최종균열길이 1.50 in)
 균열화된다. 이 표면균열의 응력집중계수는 그림 6은 균열전파에 따른 잔존수명으로
 파괴인성을 초과하므로 로터 자체가 파괴에 최종수명은 약 18,000회이다. 표 3은 초기균

표 3 초기 균열길이와 잔존수명(평택화력 고압 터빈로터)

| 초기균열의 반경 $a_o/2$ (in) | 임계균열길이 a_o (in) | 수명가동횟수 N (cycle) |
|--------------------------|----------------------|---------------------|
| 0.1000 | 1.0000 | 0.180924E+05 |
| 0.2000 | 0.8960 | 0.410841E+04 |
| 0.3000 | 0.9000 | 0.291373E+04 |
| 0.4000 | 0.8960 | 0.209853E+04 |
| 0.5000 | 0.9000 | 0.151219E+04 |
| 0.6000 | 0.9000 | 0.104153E+04 |
| 0.7000 | 0.8960 | 0.644644E+03 |
| 0.8000 | 0.8960 | 0.318272E+03 |

열길이가 잔존수명과 관계로 초기 균열길이가 크면 클수록 잔존수명은 급속히 감소함을 알 수 있다.

4. 맺음말

본 연구에서 개발된 균열전파예측 프로그램을 연구대상 발전소의 터빈로터 보어에 임의로 균열의 존재를 가정하고, 수명예측을 실시한 결과 기개발되어 사용되고 있는 제작사 프로그램의 해석결과와 잘일치하여 효용성이 입증되었으므로 국내 기술진에 의한 화력발전소용 고온고압후육부의 균열전파해석 기술을 확보하였다. 