

터빈 로우터의 재 사용설계를 위한 파괴역학적 응용

이 역 섭
인하대학교 기계공학과 교수



●1947년생
●파괴역학을 전공하였으며, 특히 동적균열전파 및 동적균열정지 특성, 또한 Optics를 이용한 K 및 J의 직접 측정에 대한 방법론을 연구하고 있으며, 초음파 탐상에도 관심이 있다.

1. 머리말

1Cr-1.2Mo-0.2V합금 강으로 만든 2개의 증기터빈 로우터를 15년 사용한 후 해체하였다. 이들 로우터들은 오늘날 많이 사용하고 있는 진공 탈가스 공정을 사용해서 제조하지 않고 1953년에 산성전로강(acid open hearth steel)으로 제작된 것이다. 따라서 로우터들은 오늘날의 표준규격에는 합격하지 못할 정도의 불순물을 함유하고 있다고 생각된다. 또한 이들 로우터들이 사용되는 주위 온도가 약 538°C 정도이었으므로 템퍼 취성이 발생되어 기계적인 성질이 매우 열화 되었으리라고 예측되며, 제작

했을 당시에 초음파탐상을 하지 않았으므로 내부특성 즉, 내부결합의 특성은 알려지지 않았다.

위와 같은 이력을 가진 로우터를 해체하여 시험설비장치 내부에 사용되는 축의 재료로 재사용하려고 한다. 이 축은 상온에서 어느 정도의 응력하에서 운전되기 때문에 급작스러운 취성파괴가 일어나지 않도록 안전성을 확인할 필요가 있으며 전체적인 신뢰도를 검토해야 한다. 필요한 파괴역학적 검토를 하기 위해서 로우터의 특성과 로우터 내부의 상황들에 대한 정보가 요구된다. 로우터들의 평균화학조성은 표 1과 같다.

표 1 로우터들의 평균화학 조성

| C | Mn | P | S | Si | Ni | Cr | Mo | V |
|------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|
| 0.34 | 0.80 | 0.025 | 0.020 | 0.33 | 0.19 | 1.05 | 1.21 | 0.21 |

터빈 로우터들의 열처리 특성은 아래와 같다.

| | 로우터 A | 로우터 B |
|-----------------|------------|------------|
| 오스테나이트 템퍼링 후 공냉 | 1010°C | 954°C |
| 템퍼링 온도 및 시간, 노냉 | 660°C 52시간 | 654°C 45시간 |

로우터의 기하학적 형상과 시험시편 채취 위치를 그림 1에 나타내었으며 원 재료의 인장시

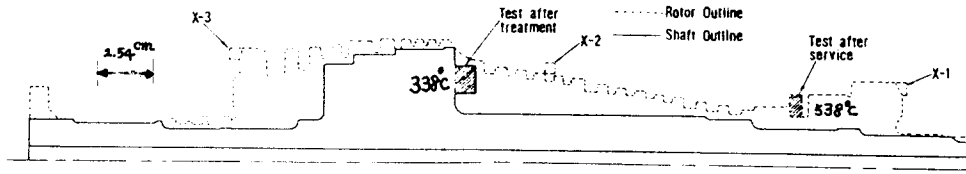


그림 1 로우터와 축의 외형 윤곽도

표 2 본래의 로우터 재료의 인장시험 결과

| 성질 | 위치 | 로우터 A | | | 로우터 B | | |
|----------------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | X1 | X2 | X3 | X1 | X2 | X3 |
| 0.2% 항복강도, MPa | | 796.5 | 703.4 | 697.9 | 627.6 | 648.3 | 664.1 |
| 극한강도, MPa | | 906.9 | 841.4 | 836.6 | 800.0 | 820.7 | 841.4 |
| 신장률, % | | 12.5 | 16.0 | 12.8 | 15.5 | 16.0 | 14.0 |
| 단면수축률, % | | 27.5 | 43.1 | 25.8 | 38.2 | 42.2 | 34.7 |

험 결과를 표 2에 나타내었다.

사용한 후에 기계적인 성질이 어떻게 변화되었는지를 알아보기 위하여 그림 1에 최대 운전 온도가 표시된 위치에서 시편재료를 채취하였다. 두 로우터의 반경방향으로 채취하여 제작한 시편으로 인장시험과 충격시험을 행하였으며 그 결과를 표 3에 나타내었다.

표 2와 표 3을 비교해 보면 이들 로우터들의 전연성이 사용한 후 상당히 감소되었으며 FATT (fracture appearance transition temperature)가 상당히 높다는 사실을 알 수 있다. 따라서 이들 로우터들은 사용도중 템퍼취화

(temper embrittlement)된 것으로 추측할 수 있겠다. 합금강의 템퍼 취화에 대한 민감성은 잘 알려져 있는 사실이다. 사용후에 행한 샬피 V-노치 시편의 파면을 주사전자 현미경 (SEM)으로 조사해 본 결과 그림 2와 같이 입계파괴 (intergranularity)의 퍼센트가 상당히 높은 것으로 보아 이들 로우터들이 사용도중 템퍼 취화된것을 확인할 수 있었다. 파괴인성치를 산정하기 위하여 여러가지의 온도에서 샬피 V-노치 충격시험을 행하였으며 식 (1)을 사용하여 파괴인성치, K_{Ic} , 를 산정하였다.

$$\left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_{ys}}\right)^2 = 5\left(\frac{CVN}{\sigma_{ys}} - 0.05\right) \quad (1)$$

여기서 K_{Ic} : 파괴인성치 (ksi/√in)

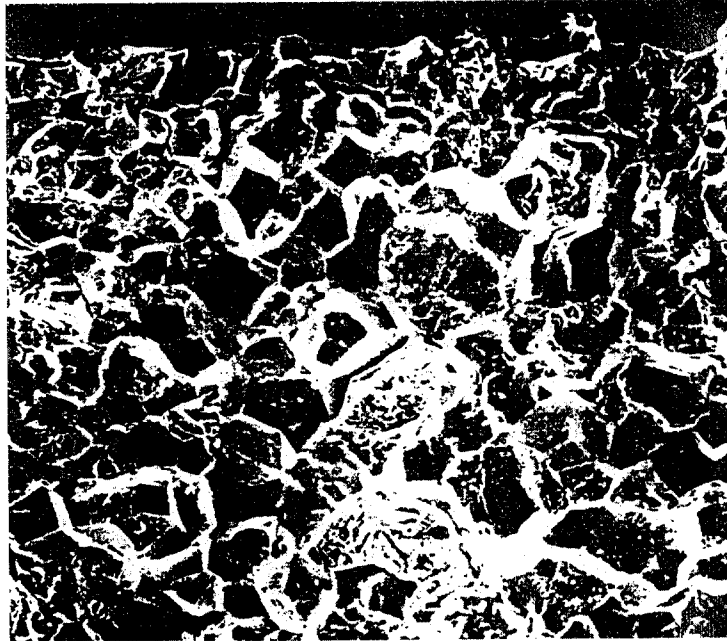
σ_{ys} : 항복강도 (ksi)

CVN: 샬피 V-노치 충격치 (lb-ft)

식 (1)을 사용하여 K_{Ic} 값을 산정할 경우, 상온에서의 K_{Ic} 값이 40~50ksi/√in (43.97~54.95 MPa√m) 정도로 산정될 경우만 식 (1)이 유용하다는 사실을 기억해야만 한다. 여기에서의 로우터는 사용도중 템퍼 취화되어 상온충격 강도가 매우 낮으며, FATT는 매우 높고, 전연성이 매우 저하되므로 식 (1)을 사용하여, 샬피

표 3 사용한 재료의 인장 및 충격시험 결과

| 특 성 | 로우터 A | 로우터 B |
|---------------------|--------------|--------------|
| 0.2% 항복강도, MPa | 680.0, 693.1 | 626.9, 633.8 |
| 극한강도, MPa | 850.3, 856.5 | 809.0, 815.9 |
| 신장률, % | 11.4, 10.0 | 15.8, 13.7 |
| 단면수축률, % | 19.2, 11.5 | 31.9, 23.4 |
| 상온 샬피 V-노치 충격치, N-m | 2.7048 | 1.356 |
| 50% FATT, °C | 302 | 216 |



(배율 50×) : 약 80% : 입계파괴
 약 20% : 벽개파괴
 시험온도 : 21°C : 충격에너지 2.705N-m

그림 2 샬피 V-노치 충격시험 파면의 SEM사진

V-노치 충격값으로 K_{Ic} 를 산정하는 것은 온당치 못할 것으로 사료된다. 따라서 여기에서는 식 (1)을 이용하여 산정된 K_{Ic} 값의 1/2을 초기 계산 과정에 적용하였는데 이것 때문에 축의 신뢰도가 저하될 가능성이 있으므로 유의해야 한다.

로우터의 파괴인성치를 상승시키기 위하여 취성을 제거하는 열처리 공정을 실험실에서 개발하여 열처리 하였다. 취성제거 열처리 후 로우터의 기계적 성질을 측정하고, 초음파탐상을 행하였다. 이러한 여러가지 기술적인 제원을 사용하여 축으로 재사용하여도 안전하다는 사실을 파괴역학적으로 검토하였다.

2. 응용방정식

축이 파손되는 과정은 크게 두가지로 나누어

생각할 수 있다. 즉,

- (1) 고 사이클 피로에 의한 균열성장
- (2) 임계균열 크기에서의 취성파괴

고 사이클피로에 의한 균열성장 거동을 해석하기 위하여서는 잘 알려져 있는 Paris의 방정식을 사용한다. 고 사이클 피로에 의한 균열성장을 방지하기 위해서는 검토하는 장소에서의 응력확대계수가 그 위치에서의 균열개시값보다도 작아야 한다. 응력확대계수는 그림 3을 참조하여 결정할 수 있다.

피로하중에 대한 응력확대계수 범위, ΔK 는 식 (2)와 같다.

$$\Delta K = \Delta\sigma(1.21\pi a/Q)^{1/2} \quad (2)$$

여기서 ΔK : 응력확대계수 범위 (MPa \sqrt{m})

$\Delta\sigma$: 교번응력 (MPa)

a : 균열길이 (m)

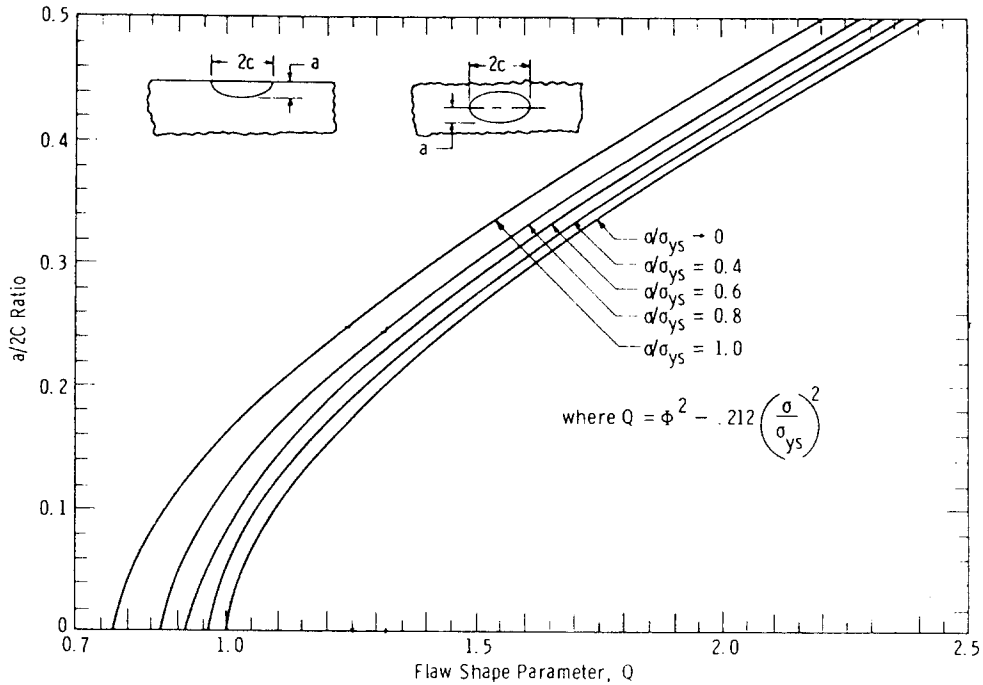


그림 3 표면균열 및 내부균열에 대한 균열 형상계수

Q : 균열형상계수이며 균열형상, 작용응력과 재료의 항복강도의 비의 함수이다(그림 3참조).

1.21: 균열이 표면과 만날때 포함되는 상수

임계균열에서의 취성과괴 가능성을 검토하기 위하여서는 균열크기가 식 (3)으로 표시되는 임계균열 크기보다 작아야 한다.

$$a_{cr} = (Q/1.21\pi) (K_{Ic}/\sigma) \quad (3)$$

여기서 a_{cr} : 임계균열 깊이 (m)

K_{Ic} : 파괴인성치 (MPa√m)

σ : 작용응력 (MPa)

식 (2)와 식 (3)은 주어진 응력상태하에 단일 균열이 존재할때에만 적용할 수 있다. 몇개의 균열들이 주위에 더불어 존재할 경우에는 이들 상호간의 간섭 가능성에 대해서도 고찰해야 한다.

만약 균열 상호간 간섭현상이 발생한다면 그림 4를 이용하여 응력확대의 간섭영향계수 (stress intensity magnification)를 결정할 수 있다. 상호간섭 정도(程度)는 균열의 크기와 간격의 함수이다.

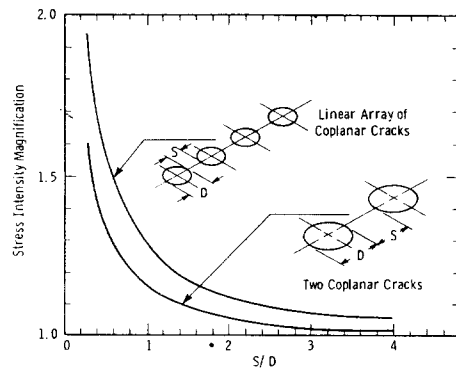


그림 4 인장응력장에 있는 원형균열의 상호간섭 영향계수

로우터 재료를 재사용하여 제작하는 시험축(test shaft)은 약 50번 정도만 사용할 것으로 예상하고 설계했으므로 초기 균열길이 a_i 가 성장하여 a_{cr} 로 되는가의 여부는 여기에서는 고려할 필요가 없을 것으로 생각된다. 축의 신뢰성을 검토하기 위하여 식 (2)와 식 (3)을 응용해야 하는데 이르기 위해서는 기계적인 성질, 초음파탐상 결과 및 축의 사용조건등을 알아야 한다.

3. 기계적 성질

로우터는 취화(embrittled)되어 그대로는 재 사용할 수 없기 때문에 여러가지의 열처리과정으로 취성을 제거해야 한다. 먼저 사용후 채취한 시편을 사용하여 실험실에서 여러가지 열처리공정을 거친 후 기계적 성질의 변화를 관찰하였다.

열처리공정 ① : 666°C에서 18시간동안 취성 제거 템퍼링 후, 정적(靜的) 공냉시켜 취화를 최소화하고, 강도 레벨을 낮추어 연성을 증가시켰다.

열처리공정 ② : 완전한 재열처리 : 954°C에서 18시간 동안 오스테나이트 처리후 38°C/hr(공정 ②-1) 혹은 149°C/hr(공정 ②-2)의 냉각률로 냉각시킨 다음, 다시 677°C에서 18시간 템퍼링한 후 공냉시킨다(공정 ②-1, 공정 ②-2).

표 4에 인장시험 및 충격시험 결과를 나타내었다.

표 3과 표 4를 비교해 보면 상온 충격강도, FATT, 연성들이 이들 열처리공정에 의해서 괄목할만하게 개선된 사실이 눈에 뜨인다. 표 4에서 공정 ①과 공정 ②의 차이는 그렇게 뚜렷하게 나타나지 않음에 주의해야 한다. 공정 ①의 과정은 4일 정도 걸리며 공정 ②의 과정은 21일 걸리는데, 두 공정에서의 기계적 성질은 크게 차이가 낄지 않으니 반드시 복잡한 공정 ②를 선택할 필요가 없다. 실험실에서는 열처리시험을 행하고, 한편으로는 시험편 채취할 부분은 그대로 남겨두고 로우터를 축 모양에 근접하게 기계 가공하였다. 이 축을 열처리한 후 초음파탐상하고 마지막으로 마무리 기계 가공하였다. 그 다음 이 축을 666°C에서 32시간 취성제거 열처리 한후 260°C까지 노냉시킨 후 공정하였다. 그 다음 그림 1의 test after treatment로 표시한 부분에서 시편재료를 채취하여 기계적인 성질을 측정하였으며 표 5에 그 결과를 나타내었다.

K_{Ic} 를 결정하기 위해서는 두께 25.4mm인 CT(compact tension)시편을 사용하여 ASTM E399의 규정을 준수하여 실험하였다.

표 5의 시험 데이터는 표 4의 데이터와 비슷함을 알 수 있다. 또한 이 재료의 균열성장 개시값 ΔK 는 다른 합금강에 대한 값을 고려하

표 4 사용한 재료를 실험실에서 열처리한 후 시험하여 얻은 데이터

| 성질 | 열처리 공정 | 로우터 A | | | 로우터 B | | |
|------------------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|
| | | 공정 ① | 공정 ②-1 | 공정 ②-2 | 공정 ① | 공정 ②-1 | 공정 ②-2 |
| 0.2% 항복강도, MPa | | 638.6 | 644.8 | 649.0 | 607.6 | 662.8 | 664.8 |
| 극한강도, MPa | | 801.4 | 817.9 | 817.9 | 783.4 | 835.2 | 836.6 |
| 연신률, % | | 15.2 | 15.6 | 16.0 | 15.8 | 16.8 | 14.5 |
| 단면수축률, % | | 32.1 | 35.6 | 37.9 | 36.6 | 37.9 | 30.5 |
| 샐피 V-노치 충격치, N-m | | 5.424 | 10.848 | 8.136 | 8.136 | 10.848 | 8.136 |
| 50% FATT, °C | | 121 | 93 | 96 | 102 | 96 | 96 |

표 5 열처리한 후 축의 기계적인 성질

| 성 질 | 축 A | 축 B |
|-----------------------------|---------------------|---------------------|
| 0.2% 항복강도, MPa | 637.9, 626.9, 631.7 | 606.9, 609.7, 610.3 |
| 극한강도, MPa | 817.1, 797.9, 802.1 | 789.7, 783.4, 786.9 |
| 연신률, % | 16.5, 14.8, 16.0 | 16.0, 17.8, 17.2 |
| 단면수축률, % | 40.7, 38.9, 36.9 | 43.4, 42.5, 41.6 |
| 상온살패 V-노치충격치, N-m | 6.78 | 5.424 |
| 50% FATT, °C | 121, 121, 121 | 127, 127, 127 |
| 상온 K_{Ic} , $MPa\sqrt{m}$ | 43.97 | 52.75 |

여 $3.3MPa\sqrt{m}$ 으로 가정할 수 있다.

4. 초음파탐상 결과

축모양에 근접하도록 기계가공한 후(그림 1 참조) 초음파탐상을 하였다. 2.25MHz중파 모우드 초음파변환기를 사용하여 축 전체를 초음파탐상으로 조사하였다. 조사 민감성(inspection sensitivity)은 두가지의 시험거리에 대해서, 표준 블록내에 있는 직경이 1.59mm인 동전모양의 구멍에 대한 진폭의 크기에 대응하게 보정(calibration)하였으며, ASTM A418의 과정을 이용하여 시험물체의 표면곡률등의 초음파 신호에 미치는 영향을 수정하였다. 초음파 신호중 크게 나타난 것들을 표 6에 표시하였다.

축 A내의 신호들은 구멍의 직경이 13.2cm인 축단 부근에서 발생되며 축 B내의 신호들은 구멍의 직경이 17.0cm인 축직경이 큰 단면 부근에서 발생된다.

5. 요구되는 기능

축의 운전온도는 상온이고 정상 회전속도는 3600rpm이며 예상되는 과부하 속도는 4320rpm이다. 축은 회전하는 동안 교번 굽힘응력을 받으며 이것이 고사이클 피로현상을 일으키

게 한다. 교번 굽힘응력은 축의 표면에서 가장 크며 구멍으로 가까와 질수록 감소된다. 축 A와 축 B에서, 초음파 신호가 방출되는 위치에서의 응력의 크기는 각각 6.9MPa와 29.3MPa이다.

축에는 접선방향 응력도 발생되는데 이 응력은 구멍표면에서 최대이며 rpm의 자수에 비례한다. 축이 회전을 시작하여 회전을 정지하는 과정 동안에 이러한 응력들이 축에 작용하게 된다. 축 A와 축 B가 4320rpm으로 회전할때 초음파 신호가 방출되는 위치에서의 응력의 크기는 각각 43.4MPa와 386.2MPa이다.

6. 평 가

6.1 고 사이클 피로파손에 대한 안전성

고 사이클 피로에 의한 균열성장으로 파손될 가능성을 해석하기 위해서는 식 (2)를 이용하여 허용 균열의 크기를 결정해야 한다. 이 경우 사용한 ΔK 는 $3.3MPa\sqrt{m}$ 이며 균열깊이에 대해서 풀어야 한다.

초음파 신호로서 조사 민감도와 비교한 등가면적으로 산정하여 표 6에 나타내었다. 균열이 표면과 만날때에는 신호면적이 반타원형상에 대응하는 것이라고 추정한다. 그림 3으로부터 $a/2c=0.25$, $Q=1.45$ 이며 최대 고 사이클 응력은 29.3MPa이므로

표 6(a) 축 A의 초음파탐상 신호

| 신호번호 | 왼쪽단부터의 거리(m) (그림1 참조) | 구멍으로부터의 거리(mm) | 각위치 | 면적(mm ²) |
|------|--------------------------|----------------|------|----------------------|
| 1 | 3.581 | 6.35 | 220° | 0.387 |
| 2 | 3.594 | 6.35 | 128° | 0.5806 |
| 3 | 3.594 | 12.7 | 218° | 0.5806 |
| 4 | 3.645 | 4.826 | 113° | 0.5161 |

표 6(b) 축 B의 초음파탐상 신호

| 신호번호 | 왼쪽단부터의 거리(m) (그림1 참조) | 구멍으로부터의 거리(mm) | 각위치 | 면적(mm ²) |
|------|--------------------------|----------------|------|----------------------|
| 1 | 1.585 | 3.048 | 175° | 0.903 |
| 2 | 1.595 | 3.048 | 153° | 1.161 |
| 3 | 1.646 | 15.748 | 15° | 0.903 |
| 4 | 1.648 | 15.748 | 78° | 0.903 |
| 5 | 1.651 | 15.748 | 84° | 0.903 |
| 6 | 1.651 | 19.05 | 45° | 0.903 |
| 7 | 1.659 | 19.05 | 30° | 1.161 |
| 8 | 1.659 | 3.048 | 55° | 0.903 |
| 9 | 1.664 | 6.35 | 70° | 0.903 |
| 10 | 1.676 | 15.748 | 58° | 0.903 |
| 11 | 1.709 | 9.652 | 145° | 0.903 |
| 12 | 1.727 | 3.048 | 15° | 0.903 |
| 13 | 1.753 | 3.048 | 358° | 1.161 |
| 14 | 1.768 | 3.048 | 345° | 0.903 |
| 15 | 1.824 | 6.35 | 270° | 0.968 |

$$\begin{aligned}
 a &= (Q/1.21\pi) (\Delta K/\Delta\sigma)^2 \\
 &= (1.45/1.21\pi) (3.3/29.3)^2 \\
 &= 4.83\text{mm이다.}
 \end{aligned}$$

$a/2c=0.25$ 인 반타원의 면적은 πa^2 이다. 따라서 고 사이클 피로균열성장이 일어나지 않는 균열 허용면적은 $\pi(4.83)^2=73.29\text{mm}^2$ 이다. 두축의 신호를 조사해 보면 균열의 상호간섭 현상을 나타내지 않으므로 가장 큰 단일 신호

만을 고려하면 된다. 지금 여기에서 계산한 허용 균열 크기는 시험하여 얻은 균열크기 중 가장 큰 1.161mm^2 보다도 약 63배 정도 더 크기 때문에 충분히 안전하다는 판정을 내릴 수 있다. 취화된 재료에 대한 균열성장 개시값 ΔK 를 알면 사용한 로우터를 가공한 후 취성제거 처리를 하지 않은 상태에서도 위와 같은 과정으로 안전성을 평가할 수 있다.

표 7 열처리 전후의 여러가지 값들

| 파라미터 | 열처리전 | 열처리후 |
|--------------------------|--------|--------|
| K_{Ic} , $MPa\sqrt{m}$ | 27.48 | 41.77 |
| σ , MPa | 386.21 | 386.21 |
| σ_{ys} , MPa | 627.59 | 606.90 |
| σ/σ_{ys} | .62 | .64 |
| $a : 2c$ | .25 | .25 |
| Q | 1.35 | 1.35 |
| a_{cr} , mm | 1.80 | 4.17 |
| Acr , mm^2 | 10.32 | 54.9 |

6. 2 급작스런 파손에 대한 안전성 평가

먼저 이 축에서의 초음파 신호중 최대신호가 최대의 응력이 작용하는 부분과 구멍근방에서 발생하는지의 여부를 검토해 보아야 한다. 이것이 가장 위험한 경우인데, 이 경우가 안전하게 판정되면 다른 경우들은 안전하다고 결론지어도 좋다.

초음파 신호의 크기와 간격을 조사해 보면 그림 4와 같은 간섭현상은 일어나지 않음을 알 수 있다. 표면에서 채취한 시편을 사용하여 인성치를 측정하였는데 구멍 근처에서는 인성치가 저하할 것으로 예상되므로 표면 K_{Ic} 값의 80%정도를 구멍 근처에서의 K_{Ic} 로 추정하였다.

따라서 구멍근처 K_{Ic} 는 열처리 전후에 각각 $27.48MPa\sqrt{m}$, $41.762MPa\sqrt{m}$ 로 산정된다. 급작스런 취성파괴가 일어날 균열크기는 식 (3)을 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$a_{cr} = (Q/1.21\pi) (K_{Ic}/\sigma)^2$$

열처리 전후의 값들을 표 7에 나타내었다.

초음파탐상으로 검출한 최대 균열면적은 $1.161mm^2$ 이며 취성제거 처리전의 임계면적과 검출 면적비는 8.9이었다.

취성제거처리후의 임계면적과 검출면적비는 47로 증가함에 유의하라. 이것으로 미루어 보아 취성제거 처리후에는 급작스런 취성파괴에 대한 안전성이 충분하다고 판단할 수 있다.

7. 맺음말

(1) Cr-Mo-V합금강 로우터재료는 사용도중 템퍼 취화된다. 템퍼취화된 소재는 취성제거처리 혹은 재열처리를 하여 취성을 감소시킬 수 있다.

(2) 축의 신뢰도를 파괴역학 원리를 적용하여 계산하였으며 템퍼 취화된 소재는 파손 위험성이 있으나 열처리 된 소재는 취성파괴 및 고 사이클 하중에 의한 피로균열 성장에 대해서 안전성이 충분하다는 결론을 얻을 수 있다.

(3) 샬피 V-노치 충격치(CVN)와 파괴인성치(K_{Ic})의 관계식을 취성재료에도 적용할 수 있는가의 여부에 대해서는 많은 조사가 필요하다.

(4) 취성소재의 피로균열 개시값 ΔK_{th} 을 알고 있으면 취성소재로 제조된 구조물의 파괴역학적인 해석을 하는데 도움을 줄 수 있다.

* 여기에서 소개한 주 내용은 미국 Westinghouse Electric Corporation의 증기터빈부에서 제공한 실험값들을 사용하여 해석한 것이다.

