

유한요소해석을 이용한 가스터빈 케이싱 열피로 균열발생 해석 Investigation of the Thermo-mechanical Crack Initiation of the Gas Turbine Casing Using Finite Element Analysis

강명수 · 윤완노 · 김준성

M. S. Kang, W. N. Yun and J. S. Kim

(접수일 : 2009년 6월 1일, 수정일 : 2009년 7월 17일, 채택확정 : 2009년 8월 20일)

Key Words : Combined Cycle Power Plant(복합화력발전소), Gas Turbine(가스터빈), Casing Bolt(케이싱 볼트), Thermo-mechanical Fatigue Crack(열피로 균열), Finite Element Analysis(유한요소해석)

Abstract : A gas turbine consists of an upstream compressor and a downstream turbine with a combustion chamber, and also the compressor and the turbine are generally coupled using a single shaft. Many casing bolts are used to assemble two horizontally separated casings, the gas turbine casing and the compressor casing, in both of axial and vertical directions. Because drilled holes for casing bolts in vertical direction are often too close to drilled holes for casing bolts in axial direction, one can observe cracks in the area frequently during operations of a gas turbine. In this study of the root cause analysis for the cracking initiating from the drilled holes of the casings of a gas turbine, the finite element analysis(FEA) was applied to evaluate the thermal and mechanical characteristics of the casings. By applying the field operation data recorded from combined cycle power plants for FEA, thermal and thermo-mechanical characteristics of a gas turbine are analyzed. The crack is initiated at the geometrical weak point, but it is found that the maximum stress is relieved when the same type of cracks is introduced on purpose during FEA. So, it is verified that the local fracture could be delayed by machining the same type of defects near the hole for casing flange bolts of the gas turbine, where the crack is initiated.

1. 서 론

복합화력발전소 가스터빈 발전기는 기저부하(base load)용뿐만 아니라 첨두부하(peak load)용 설비에서도 높은 효율과 다양한 이용성이 입증되어 왔으며, 90년대 초반부터 건설되기 시작하여 현재 국내 발전설비의 약 30%를 차지하고 있다. 가스터빈은 압축기, 연소기 그리고 터빈으로 구성되어 있다. 일반적으로 압축기와 터빈은 단일 축으로 되어 발전기와 연결된다. 대기 중의 공기가 압축기로 유입되어 10~14 atm의 압력을 갖게 되고 압축된 공기는 연소기로 이동하며 유입된 연료와 함께 연소된다. 고온의 연소 가스는 터빈을 통과하면서 팽창하게 되고 대기 중으로 방출된다.

복합화력발전소 가스터빈에서는 높은 크리프 강

도를 지닌 저 합금강의 대형 주물들이 고온과 고압의 응력이 집중되는 가스터빈 및 케이싱에 사용되고 있다. 기존의 화력발전소와 비교했을 때, 동일한 재료를 사용하고 있지만 기동 및 정지 횟수가 많기 때문에 열피로나 취화 현상으로 인한 균열의 발생 가능성은 상당히 높다. 케이싱에서 균열이 발생할 경우 고온 고압의 증기나 가스가 누설되어 심각한 피해를 주게 되며 형태, 재질 및 운전 조건 등이 복합적으로 영향을 주기 때문에 효과적으로 정비하는 것은 쉽지 않다. 가스터빈 부품의 수명은 주로 크리프와 열피로에 의해 소모된다. 크리프 손상은 고온에서의 장시간 운전에 의한 것이고, 열피로 손상은 반복되는 기동·정지에 의한 것이다. 이들 크리프와 열피로 손상은 같은 부품에 손상을 가져오면서도 서로 발생의 이론적 근거는 다르다. 즉, 크리프는 운전시간, 열피로는 기동·정지 횟수가 주요 원인이다¹⁻³⁾.

본 논문에서는 복합화력발전소의 실제 운전데이터를 바탕으로 천이상태 열전달 및 열응력 해석을

강명수(책임저자) : 한전 전력연구원 엔지니어링센터
E-mail : mskang@kepco.co.kr, Tel : 042-865-7513
윤완노, 김준성 : 한전 전력연구원 엔지니어링센터

수행하여 가스터빈 케이싱(압축기 출구 케이싱) 접합 플랜지(flange)에서 발생한 균열의 발생원인을 분석하고 균열이 발생한 가스터빈 케이싱에 대한 효과적인 정비 방안을 제안하고자 한다.

2. 설비개요 및 손상특성

2.1 설비개요

손상이 발생한 설비는 복합화력발전소 가스터빈 케이싱 접합 플랜지 부분이며, 1996년부터 상업운전을 시작한 150 MW 용량의 가스터빈 2대와 150 MW 용량의 증기터빈 1대가 1개의 블록으로 구성되어 있다. 설비의 주요 규격은 Table 1과 같다.

Table 1 Specification of the gas turbine

Items	Unit	Specification
Type	-	Reaction, axial flow, open cycle
Number of stage	stage	4
Rotor speed	rpm	3,600
Max output	kW	160,160(LNG)/165,040(diesel)
Amount of fuel consumption	kg/hr	32,183(LNG)/40,005(diesel)
Turbine inlet temp	℃	1,293
Turbine outlet temp	℃	604

2.2 운전

복합화력발전소의 운전모드는 연간 운전 시간과 기동(시간의) 횟수에 의해 결정되고 기동모드는 설비가 정지되고 다시 운전하기 시작할 때의 시간에 따라 분류된다. 운전 모드는 열간, 온간, 냉간기동으로 구분할 수 있으나 기력 터빈과 달리 가스터빈 설비의 경우 부하추종에 따른 기동 및 정지시간이 짧다. 한편 냉간기동의 경우 운전이 시작하고 정격출력에서 정상상태에 이르기 전까지 기동시간에 따른 터빈케이싱의 내부와 외부 온도차이가 온간이나 열간기동에 비해 상당히 큰 값을 갖는다. 터빈 케이싱에서의 열응력이 해당 설비의 온도 분포에 영향을 받기 때문에 온도에 따른 열팽창계수의 독립성을 가정한다면 냉간 기동시의 열응력이 온간이나 열간기동에 비해 큰 값을 갖게 된다고 예측할 수 있다. 결과적으로 냉간기동의 주기적인 반복을 고려하여 가스터빈 케이싱에 발생하는 최대 응력을 계산해야 한다. 본 연구에서는 냉간기동 및 정지시 시간에 따른 운전 조건을 고려하여 열전달 해석과 열응력 해

석을 수행하였다⁴⁾.

2.3 손상특성

가스터빈의 경우에는 블레이드(blade)나 베인(vane)에서 크리프나 저사이클 피로에 의한 손상이 발생하는 것으로 알려져 있다. 그러나 최근 들어 국내 발전사에 설치되어 있는 Westinghouse 501F 종류의 가스터빈 케이싱에서 공통적으로 균열이 발견되고 있다. 균열이 발생한 가스터빈 케이싱의 형상은 Fig. 1과 같고, 상하 분할형의 가스터빈 케이싱이 압축기 케이싱과 연결되는 부위는 Fig. 2와 같이 4분할로 접합되는 부위로 축방향으로 수많은 볼트에 의해 연결되고, 상하 방향으로도 볼트에 의하여 체결되고 있다. Fig. 2에서 상하 방향으로 연결되는 볼트를 tightening하기 위해 수직방향으로 케이싱을 가공하였는데, 이 부위가 수평방향 접합용 플랜지의 볼트 홀(hole)과 인접되어 있어, Fig. 3과 같은 ㉔에서 시작하여 ㉕방향으로 균열이 발생되고 있다.

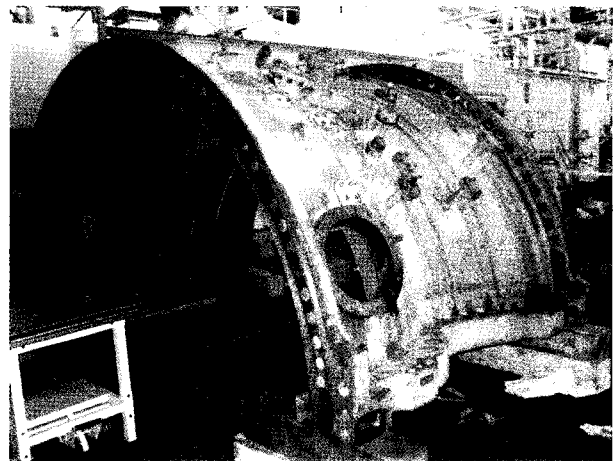


Fig. 1 Photo of gas turbine casing

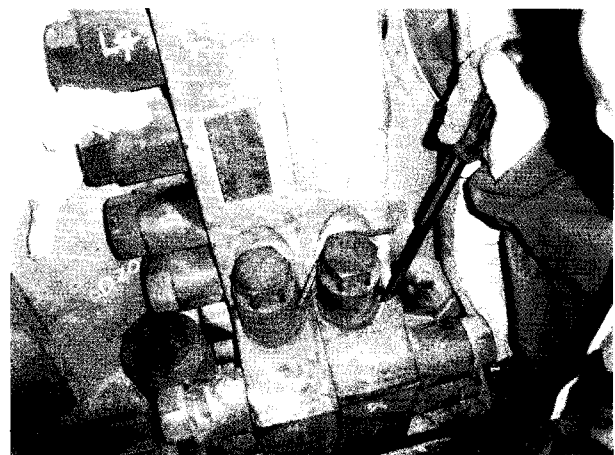


Fig. 2 Bolts tightening of gas turbine casing

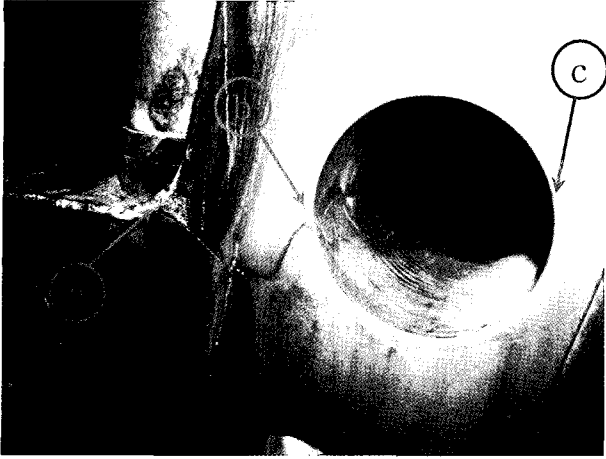


Fig. 3 Thermo-mechanical fatigue crack of gas turbine casing

3. 열전달해석 및 응력해석

3.1 가스터빈 케이싱 모델링

가스터빈 케이싱에 발생한 균열의 원인을 분석하기 위하여 케이싱을 현장에서 실측하여 CAD 도면을 작성하였고, 이 도면을 기본으로 하여 유한요소 해석을 위한 3차원 모델을 만들었다.

유한요소해석 모델은 Fig. 4와 같고, 가스터빈 케이싱의 경우 상하좌우가 대칭인 구조를 갖고 있으며 열적 하중에 의한 영향만을 받기 때문에 유한요소해석 시 요소 개수를 줄이고 이를 통해 계산시간을 줄이고 자 축대칭 형상의 특성을 고려해 1/4형상에 대해 모델링하고 열전달 해석 및 응력해석을 수행하였다.

3.2 케이싱 재료물성 및 해석조건

가스터빈 케이싱 재료는 일반적으로 SA-387A Grade 22가 사용되며 열전달 및 응력해석을 위해 Table 2, 3, 4에 제시된 물성치를 사용하였다.

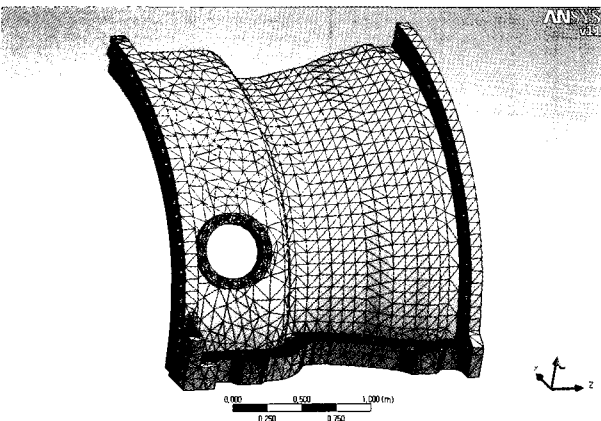


Fig. 4 FEA model of gas turbine casing

가스터빈 케이싱에는 기동시 온도 변화에 따른 열응력뿐만 아니라 시간에 따라 케이싱 내부 및 외부에 작용하는 압력, 케이싱의 하중 및 연결부에서의 힘에 의한 기계적 응력이 발생한다. 그러나 케이싱 내외부의 압력이 전체 영역에 걸쳐 고르게 가해져서 국부 영역에서 과도한 응력을 발생시키지 않고 압력에 의한 응력의 크기도 상대적으로 크지 않다. 본 해석에서는 기동시 천이상태에서의 열전달을 고려하여 30분 동안 상온에서 400℃ 정도의 증기가 유입되는 상태를 조건으로 상용소프트웨어인 ANSYS를 이용하여 열전달 및 탄성 응력해석을 수행하였다.

Table 2 Mechanical properties of SA-387A Grade 22

Mechanical properties	Value
Tensile strength, ultimate	515 - 690 MPa
Tensile strength, yield	310 MPa
Elongation at break	18.0 %
Rupture strength	50.0 - 57.0 MPa @ Temperature 575 °C, Time 100,000 hour
	70.0 - 77.0 MPa @ Temperature 550 °C, Time 100,000 hour
	89.0 - 110 MPa @ Temperature 525 °C, Time 100,000 hour
	110 - 149 MPa @ Temperature 500 °C, Time 100,000 hour
	38.0 MPa @ Temperature 600 °C, Time 100,000 hour
Poisson's ratio	0.3
Young's modulus	$E = \sum_{i=1}^6 A_i T^{i-1}$ A; material parameter, T; temp

Table 3 Material components properties

Material components properties	Value
Carbon. C	0.050 - 0.15 %
Chromium. Cr	2.0 - 2.50 %
Iron. Fe	95.1 - 96.75 %
Manganese. Mn	0.30 - 0.60 %
Molybdenum. Mo	0.90 - 1.10 %
Phosphorous. P	<= 0.025 %<
Silicon. Si<	<= 0.50 %<
Sulfur. S<	<= 0.025 %<

Table 4 Thermal properties

Properties		Conditions, T(°C)
Thermal expansion (10 ⁻⁶ /°C)	11.2	0-100 more
Thermal conductivity (W/m-k)	36.7	100 more

3.3 열전달 해석

케이싱 모델을 이용하여 기동시 가스 및 증기 조건을 고려하여 과도 열전달 해석을 수행하였고, 열전달 해석 결과는 특정 시간에 대한 열응력을 계산하는데 사용하였다.

일반적으로 가스터빈 로터는 고속 회전체로서 고온·고압의 증기와 열교환을 한다. 따라서 로터는 자체 회전속도에 증기의 유속이 더해져 기동 시에도 로터 표면에서 높은 열전달 계수가 나타난다. 이때 국부적인 영역에서의 열전달계수는 대류 및 전도를 고려하여 제작사에서 제시한 실험식에 의해 결정할 수 있다.

그러나, 가스터빈 케이싱은 고정체로서 단지 증기의 유속에 의해서만 열전달계수가 결정되므로 예열시 증기와 높은 온도차로 인해 상변화에 의한 열교환 시기를 제외하면 열전달 표면이 로터에 비해 상대적으로 낮은 열전달계수가 나타난다.⁽⁵⁾ 본 해석에 적용된 케이싱의 경우 일반적인 증기터빈 기동과 다르게 짧은 시간동안 상온의 설비에 증기가 유입되는 기동 특성을 갖고 있기 때문에 케이싱 재질에 대한 Table 5와 같은 열 물성치를 적용하여 해석을 수행하였다.

가스터빈 기동시 케이싱 내부로 온도 400 °C, 압력 17 kgf/cm²의 가스가 유입되기 때문에 기동 후 30분이 경과되면 케이싱의 내부에서 외부로 열전달이 이루어지며 케이싱 전 영역에 걸쳐 온도구배가 발생한다. 케이싱 열전달 해석을 수행할 때에는 케이싱 외부 온도의 변화 추이를 고려하여 경계조건을 설정하였다. 케이싱에 대한 열전달 해석 결과는 Fig. 5와 같다.

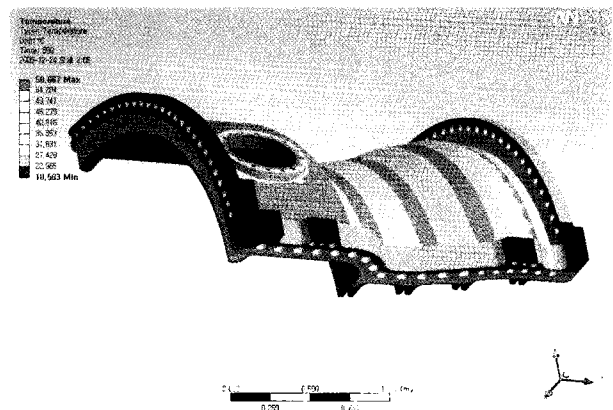
3.4 응력해석

응력해석은 케이싱 볼트 홀 주변의 최대 응력의 분포 정도를 파악하는데 목적이 있으며 실제 설비의 거동을 모사하기 위해 사진과 현장 점검으로부터 확인한 운전 및 구속 조건을 적용하였다. 그러나 예측하기 어려운 복잡한 운전 및 구속조건에 대해서는 다음과 같이 일부 가정하여 응력해석을 수행하였다.

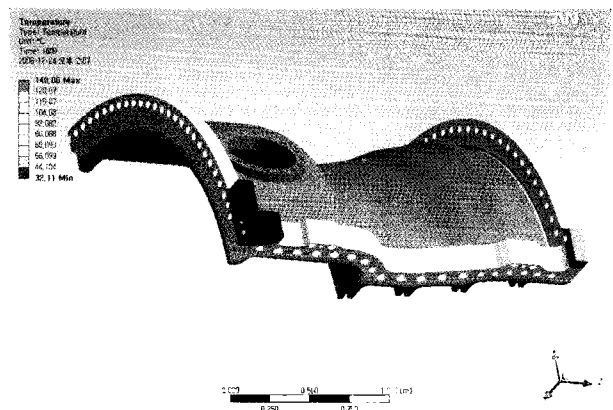
- ◊ 기동시 온도변화는 선형적으로 증가
- ◊ 케이싱 일부 영역에 대해 자유도 구속
- ◊ 체결부는 볼트의 수직방향에 대해서만 고정
- ◊ 1/4 모델에 대해 symmetry 조건 부여

Table 5 Thermal properties of SA-387A

Thermal property	Unit	Value
Density	kg/m ³	7,850
Conductivity	W/m°C	36.7 (100°C)
		33.7 (500°C)
Specific heat	J/kg · °C	434
Expansion coefficient	kg/hr	1.12×10 ⁻⁵



(a) 10 minute after start-up

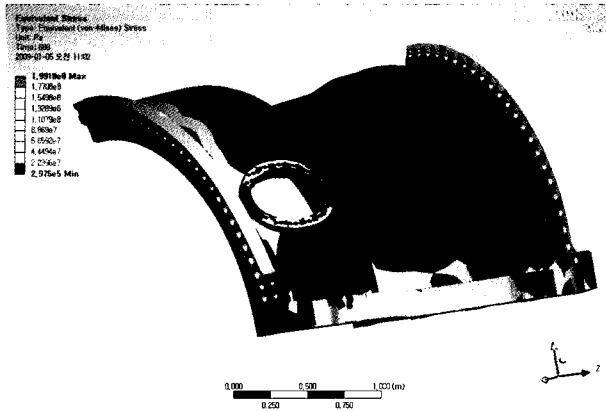


(b) 30 minute after start-up

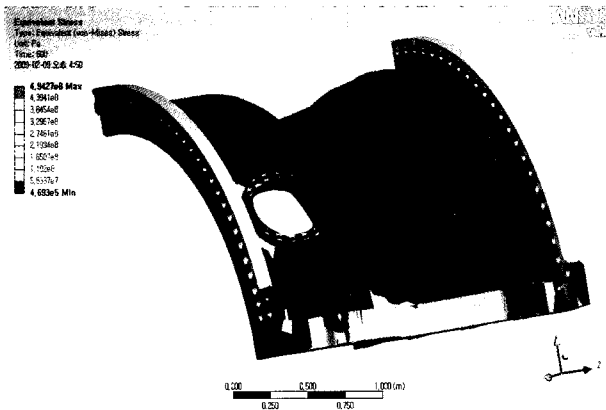
Fig. 5 Heat transfer analysis result of gas turbine casing

열전달 해석을 통해 구한 온도분포와 케이싱의 기계적인 구속조건을 반영하여 수행한 응력해석의 결과는 Fig. 6과 같다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 국부적인 영역에서 최대 등가응력이 발생하고 있음

을 알 수 있다. 실제 균열이 발생한 부위, 즉 기하학적으로 형상이 취약한 영역(Fig. 3의 ㉠ 부분)에서 항복강도를 넘는 응력이 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 해당 부위에서 반복적인 열응력에 의한 초기 균열이 발생하였음을 판단할 수 있다.



(a) 10 minute after start-up



(b) 30 minute after start-up

Fig. 6 Stress analysis result of gas turbine casing

4. 균열발생 방지대책을 위한 해석

4.1 균열 발생부 모델링

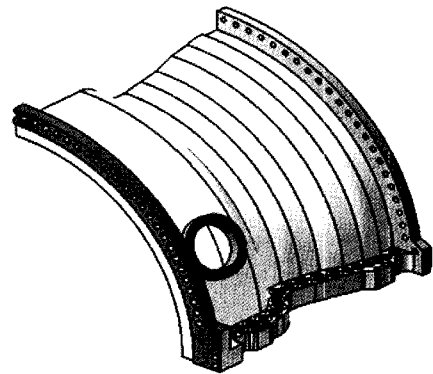
초기균열이 발생했던 케이싱에 대한 CAD 도면을 토대로 인위적으로 플랜지 볼트 홀 주위에 균열을 만들어 균열이 1개부터 5개까지 추가했을 경우에 대한 해석을 수행하고자 Fig. 7과 같이 각각의 경우에 대한 3차원 모델링을 하였다.

4.2 열전달 해석 결과

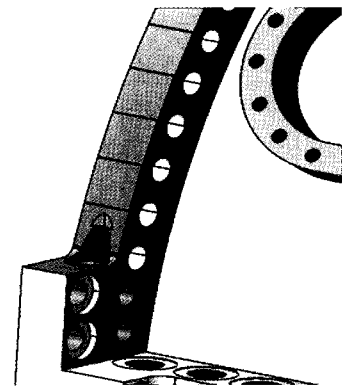
Fig. 7의 모델을 이용하여 기동시 가스 및 증기 조건을 고려하여 과도 열전달 해석을 수행하였다. 플랜지 볼트 홀 주위 균열의 개수에 따른 열전달 해

석 결과는 특정 시간에 대한 열응력을 계산하는데 사용된다. 열전달 해석 결과 균열의 개수가 증가했을 때에도 전반적인 온도 분포는 큰 차이를 보이지 않았다.

열전달의 경우 균열의 개수를 증가시켰을 경우에도 별다른 차이를 보이지 않는데 이는 국부적인 형상 차이가 해석 모델 전 영역의 열전달에 큰 영향을 갖지 않고 뚜렷한 고온 및 저온 변화가 발생하는 열경계 부위에 해당되지 않기 때문인 것으로 사료된다.



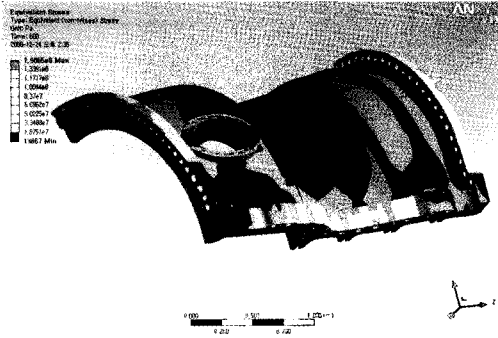
(a) One crack added near stress concentrated area



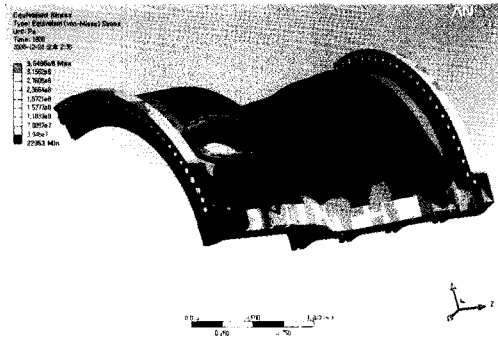
(b) Five cracks added near stress concentrated area
Fig. 7 FEA model of gas turbine casing with crack

4.3 응력해석

균열의 개수에 따른 최대 응력의 변화 정도를 파악하기 위하여 균열의 개수에 따라 수행한 응력해석의 결과는 Fig. 8 및 Fig. 9와 같다. Fig. 10과 Table 5는 초기 균열 모델을 포함하여 인위적으로 균열을 증가시켰을 때의 응력값을 비교한 것이다. Fig. 8~10의 응력해석 결과를 보면 알 수 있는 바와 같이 초기 균열 발생 후 동일한 형태의 균열을 인근 플랜지 홀에 인위적으로 만들었을 때 취약 부분에서의 응력이 감소한다는 것을 확인할 수 있다. 기하학적 형상으로 인한 취약 부위에 응력이 집중

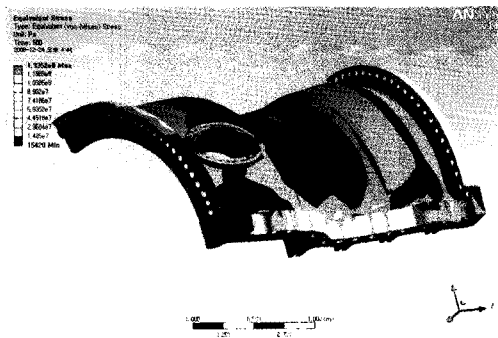


(a) 10 minute after start-up

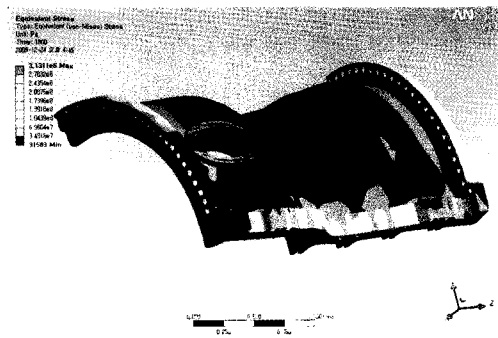


(b) 30 minute after start-up

Fig. 8 Stress analysis result of one crack added model



(a) 10 minute after start-up



(b) 30 minute after start-up

Fig. 9 Stress analysis result of five crack added model

되어 초기 균열이 발생하였지만 인근 부위에 동일한 형태의 균열이 만들어질 때 집중되었던 응력이 완화되어 최대 응력값이 감소하는 것으로 판단할 수 있다.

응력해석 결과를 통해 초기 균열이 발생하고 정비나 보수 없이 운전을 해야 할 경우 초기 균열이 발생한 부위의 인근 플랜지 홀에 동일한 형태의 균열을 만드는 것이 국부적인 영역에서의 파손을 막을 수 있는 하나의 대안이 될 수 있다고 사료된다.

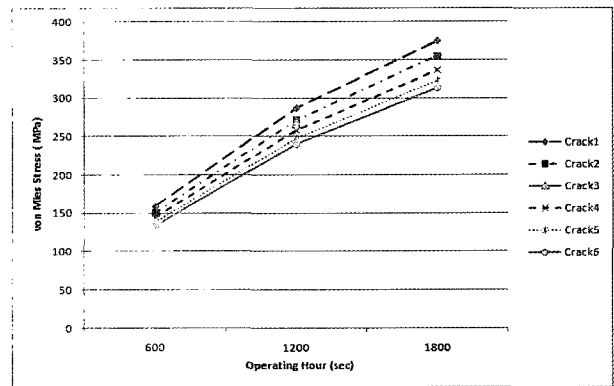


Fig. 10 Comparison of stress analysis result between the number of cracks

Table 5 Maximum equivalent stress according to the number of cracks

Cracks \ Start up time	0	1	2	3	4	5	6
After 10 min	199.2	159	150.7	-	143.9	138	133.5
After 20 min	372.7	286.9	271.9	267.4	258.4	248.1	240
After 30 min	494.3	374.3	355	-	336.5	323.5	313.1
Max stress position	Fig.3 ㉔	Fig.3 ㉕					

- ※ Stress concentration area
- Outward edge of the casing bolt hole(Fig.3 ㉔)-200 MPa
- Inward edge of the casing bolt hole(Fig. 3 ㉕)-180 MPa

5. 결 론

가스터빈 케이싱 접합 플랜지 볼트 홀에서 발생한 균열의 원인을 분석하고, 균열발생 방지 대책 수립을 위하여 수행한 해석 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 케이싱의 열전달 해석을 수행한 결과 균열의 개수에 관계없이 케이싱 전체 영역에 대해서 유사한 온도 분포를 나타내고 있음을 확인하였다.

2) 케이싱의 응력해석 결과 실제 균열이 발생한 부위에서 항복강도를 넘는 응력이 발생하는 것을 확인하였으며, 해당 부위에서 반복적인 열응력으로 인해 초기 균열이 발생하였음을 판단할 수 있다.

3) 균열 개수의 증가로 인해 국부적인 영역에서의 응력이 완화하였다. 균열이 발생한 응력집중부 인근 부위에 동일한 형태의 균열을 만들면 집중되었던 응력이 완화되어 최대 응력값이 감소하는 것으로 판단할 수 있다.

4) 초기 균열이 있을 때 인근 플랜지 홀에 동일한 형태의 균열을 만들어 국부적인 영역에서의 파손을 예방하는 것이 가능하다.

5) 현재 균열이 발생된 상태에서는 볼트 홀의 안쪽(케이싱 내면측)의 응력이 증가하여, 기동·정지시 과도한 응력집중 현상이 발생될 수 있다. 또한 기동시 케이싱 온도의 급격한 변화로 케이싱의 열변형이 균열부위로 집중되어, 압축공기가 더 많이 누설될 수도 있다. 따라서 향후 장기적인 안정적 운전을 위해서는 급변의 해석 결과와 같이 응력 분산을 유도하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. Boyce M. P., 2001, "Gas Turbine Engine Handbook", pp. 22~410.
2. 강명수 외, 2007, "축류 압축기 블레이드 손상시 터빈부품에 미치는 영향", 한국동력기계공학회, 제11권 제3호.
3. 윤완노, 2007, "가스터빈 압축기 블레이드의 손상", 발전설비 진단기술 워크숍, 한전 전력연구원, pp. 101~114.
4. 한전전력연구원, 2009, "울산복합 #3 ST 및 #6 GT 수명진단".
5. Woosung Choi and Jungseob Hyun, 2008, "A life assessment for steam turbine casing inelastic analysis", Modern Physics Letter B, Vol. 22, pp. 1141~1146.