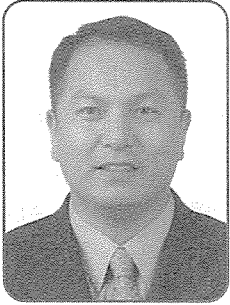


발전기 리테이닝링/슬롯단부의 해석 및 수명평가기술(Ⅱ-1)



한전기공(주)
기술연구원
일반연구원 이동민
Tel : (031)710-4185

□ 개요

발전기의 회전자 단부 권선부는 회전발생되는 부분으로 리테이닝 링(Retaining Ring)을 이용하여 지지한다.

발전기 회전자 단부 제작당시 권선 중 필수적으로 부 권선부를 지지하는 리테이닝 링과 권선을 내장하는 슬롯 단부(Slot Tooth)는 정상 운전과 정지를 반복하면서 원심력, 열박음, 회전력에 의해 약 400-600 Mpa 정도의 기계적 스트레스를 받게 되며 이 반복적인 스트레스와 SCC(Stress Corrosion Crack)에 의해 리테이닝 링의 미소 크랙(Crack) 또는 파단사고가 보고되고 있다.

국내 제작사의 경우 기 설계된 도면에 따라 제작하여 조립하고 있는 실정이며 정비 업무/수명연장 공사 시 권고할 수 있는 기준과 모델링, 모의 평가 및 해석 기술이 자립되어 있지 않다. 이미 EPRI와 SI사와 같은 곳에서 자국 내에서 운전 중 발견된 결함과 기 발생된 사고를 토대로 사고 분석이 이루어졌으며 또 대형 사고를 미연에 방지하기 위해 검사, 현 상태분석, 잔존수명평가, 운전상태 권고 등을 수행하고 있다.

1. Retaining Ring Inspection and Life Assessment

가. FUNCTION AND DESIGN

리테이닝 링의 주요기능은 발전기 회전자 끝단의

계자코일을 운전중의 원심력에 견딜 수 있도록 지지해주는 구조로 되어 있으며 이는 정상운전 상태에 있어서 원심력의 20% 이상까지 견딜 수 있도록 설계되어 있다.

2극기 대형 발전기에서 이러한 링들은 전형적으로 외경이 약 50Inch, 길이 35Inch, 두께 3Inch, 무게 500lb 정도이다. 링의 재료로는 비자성강으로 수많은 연구와 실험결과 인가 여자 전류의 감소와 기기의 반작용 및 단부 손실을 줄일 수 있다고 보고되고 있다.

수많은 유럽의 제작사들의 의해서는 이미 1930년대 초반부터 비자성강의 링을 제작하여 사용 했으며 1940년대에 들어서면서 일반화되기 시작 했고 아직도 특수한 용도의 발전기에서는 자성강을 재료로 한 링을 사용하고 있다. 링의 구조를 살펴보면 그림 1과 같다.

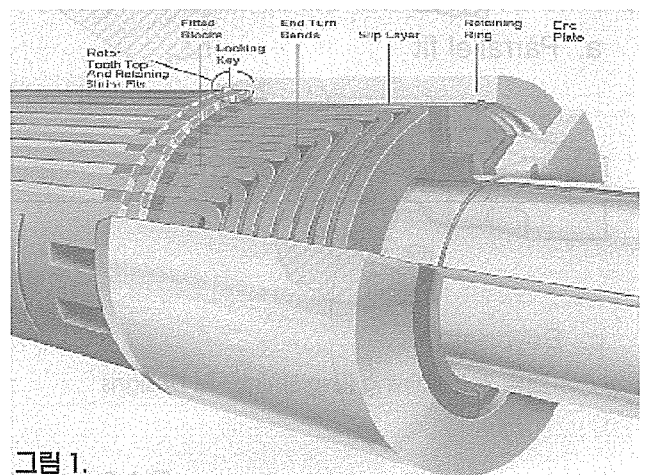


그림 1.

Section View of Retaining Ring&Rotor End Windings

회전자 코일 단부 조립 구조는 원통형의 링과 이 링 끝단에 End Plate 또는 Center Ring으로 일체를 이루고 있다. 이 구성품은 회전자 몸체에 Shrink-Fit으로 조립되며 원주길이의 링 키에 의해 축방향의 움직임을 방지한다. 링 라이너는 단부권선과 링 내측 간에 전기적으로 절연을 유지하며 또한 운전중의 단부 지지구조물에 관계한 계자코일이 축 방향으로 움직일 수 있는 공간을 제공한다.

1) Retaining Ring Typical Cross-Section

: 그림 2는 전형적인 Generator Retaining Ring 단면 형상을 보여주고 있다. End Ring 부위에는 Generator Rotor와 Ring이 열박음 되어 고정된다. 따라서 열박음 형상은 리테이닝 링을 고정 시키면서 원심력에 의해 발생하는 힘을 견디도록 설계 되어있다. 그림 3은 다양한 열박음 형상을 보여주고 있다.

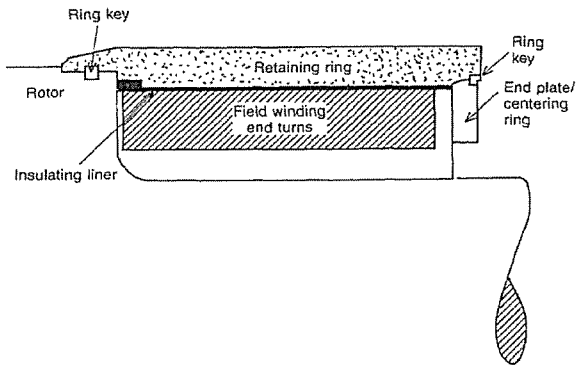
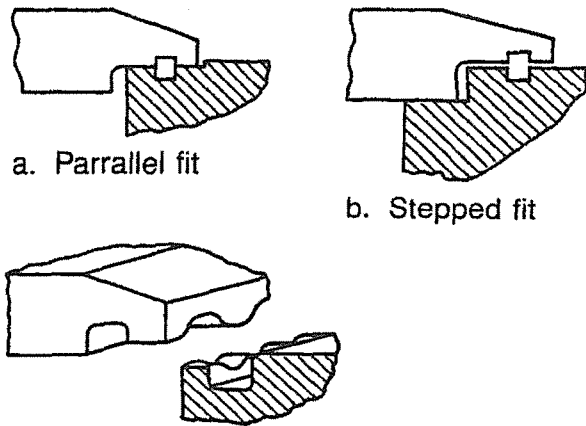


그림 2. Typical Retaining Ring Cross-Section



c. Bayonet fit

그림 3. Retaining Ring Shrink-Fit Designs

2) Retaining Ring Design Stress

: 리테이닝 링은 가동시 링과 코일에 의해 발생되는 하중을 지지하는 구조를 가지므로 고강도의 재질을 사용하고 있다. 아래 표는 전형적인 링에서 발생하는 응력을 보여주고 있다. 따라서 리테이닝 링은 이러한 응력을 견딜 수 있는 재질과 형상으로 설계 되어져야한다.

3) Retaining Ring Deflection

: 리테이닝 링은 양끝단이 열박음이 되어있고 가동 중에는 원심력에 의한 힘을 받음으로 링의 형상에는 그림 과같은 변화가 일어나게 된다. 링의 중심 부위에서 정상운전 중에 원심력에 의해 60mils까지 변화하게 되며, 20% 과속 조건에서 80mils까지 변화하게 된다.

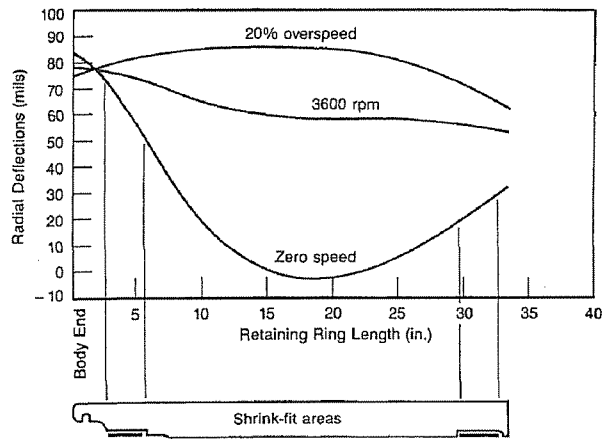


그림 4. Retaining Ring Deflections

나. 18Mn-5Cr Failure

① Labadie, 1972 -Baffle Ring,
IGSCC+Stress Concentration+Machining Tears

표 1. Typical Stress of Retaining Ring

Location	Standstill	Normal OP	20%OS	
	0RPM	3600RPM	4329RPM	
Hoop Stress(ksi)				
Mid-length bore	0-10	70-90	110-125	
Fillet behind Shrink-Fit	50-100	70-120	110-125	
Keyway	60-80	70-95	85-105	
Axial or Bending Stress(ksi)				
Fillet behind Shrink-Fit	90-110	50-65	25-40	
Keyway	0-20	20-40	30-50	

- ② Hudson, 1972 - Baffle Ring, IGSCC+Stress Concentration+Machining Tears
- ③ Skaerbeck, 1973 - Water - Cooler Rotor Leak
- ④ Scholven, 1978 -Condensation During Prolonged Storage
- ⑤ Harduagunj, 1978 - Overspeed : Yielded BUT DID Not Failed
- ⑥ Mulheim, 1978 - Low Ductility
- ⑦ Barsebeck, 1979 - Water - Cooled Rotor Leak
- ⑧ Nelson - Cracked But Did Not Failed
- ⑨ Astoria, 1990 - Operation in Moist Hydrogen

1) Retaining Ring Failure Worldwide

표 2. 리테이닝 링 사고건수

재 질	사고 건수	비 고
8Mn-8Ni-4Cr	15	
18Mn-5Cr	9	
Magnetic Steels	5	
Gannaloy	5	
Unknown	2	
10Mn-6Ni-4Cr	2	
13Ni-5Mn-3Cr	1	
Total	39	

2) 환경인자

가) 수소냉각 발전기

(1) 장 점

가동 중에 오픈 되지 않기 때문에 외부 환경과 직접 노출되지 않는다.
일단 건조되면, 유지 보수가 쉽다.

(2) 단 점

만일 실 가스의 환경이 습기를 함유하고 있다면 기동 후 도체 내부로 습분이 침투한다. 건조기가 정상 작동을 하지 않는다면 더 많은 습분에 노출되게 된다.

나) Open Air Cooled Generator

(1) 장 점

도체로부터 습기를 제거하기가 쉽다. 발전정지 시 히터를 이용해 온도를 올릴수 있다

(2) 단 점

특히 출력 감발 시 공기에 습분이 함유되면, 히터를 항상 이용할 수 없다.

2. Retaining Ring Life Assessment

가. Retaining Ring 수명 평가 절차

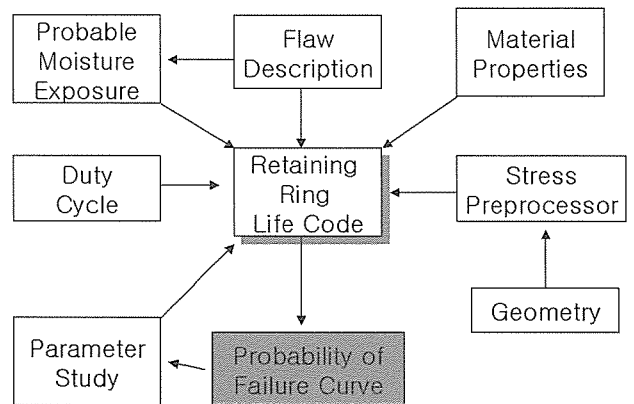


그림 5. 리테이닝 링 수명평가 절차

그림 5는 전산 프로그램을 활용한 리테이닝 링의 수명평가 절차를 보여주고 있다. 기하학적 형상을 기초로 한 응력해석을 통해 각각의 조건하에서 응력 분포 값을 얻는다. 현장 비파괴검사를 통해 발견되는 결함은 결함의 정의 작업을 통해 수명평가의 인자로 사용된다. 운전 혹은 정비 중에 접하는 습분에 대한 노출은 SCC 평가에서 중요한인자이다. 그림 5에서 보이는 인자들을 종합하여 확률론적인 수명곡선을 얻게 된다. 하지만 확률론적 수명평가에서는 결정론적 수명평가에서 처럼 결과를 결론지을 수 없기 때문에 영향 인자들을 변화시키면서 수명평가를 수행하게 된다. 이러한 작업을 되풀이 하면서 합리적인 수명평가 결과를 얻게 된다.

나. 잔류 수명평가

: 잔류 수명의 계산은 초기 결함의 발생되는데 걸리는 시간에, 발생된 결함이 임계 크기까지 성장하는데 걸리는 시간을 합한 시간이 된다.

Remaining Life(t_{rem}) = $t_{ini} + (a_{cr} - a_i) / (da/dt)$
 여기서; t_{ini} = SCC가 발생하는 시간
 da/dt = SCC 성장률
 a_{cr} = 임계결합크기

다. RRing-Life를 이용한 응력해석

: EPRI RRing-Life는 발전기 모델을 선택하여 응력해석을 수행할 수 있도록 프로그램 되어있다.

1) Built-In Stress Solutions

: 프로그램에는 총 6개 타입이 내장되어 있어 해당 타입을 선택하여 해석을 손쉽게 수행할 수 있다

가) Westinghouse Type : 3 EA

- 40-inch Diameter -2 Pole
- 43-inch Diameter -2 Pole
- 67-inch Diameter -4 Pole

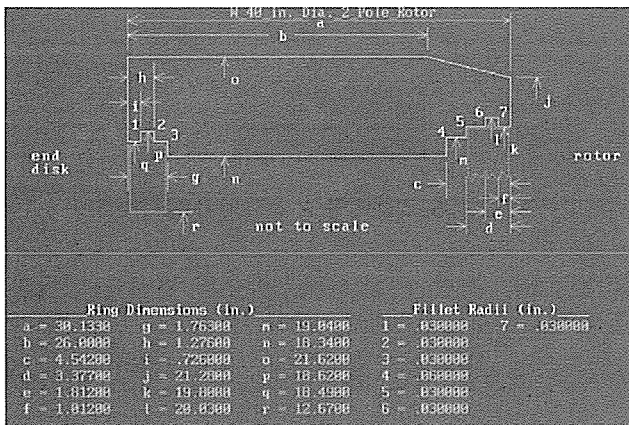


그림 6. 40-inch Diameter -2 Pole

나) General Electric Type : 2 EA

- 42-inch Diameter -2 Pole
- 75-inch Diameter -4 Pole

다) Allis-Chalmers : 1 EA

- 40-inch Diameter -2 Pole

2) FE Mesh Generation & Stress Analysis (Special Module)

: 응력 해석 수행을 위한 Mesh 생성과 응력 해석에 필요한 모듈이 내장되어 있다. 절차는 앞서 선택한 모델에 Mesh Generation를 수행 후 응력 해석을 수행하게 된다.

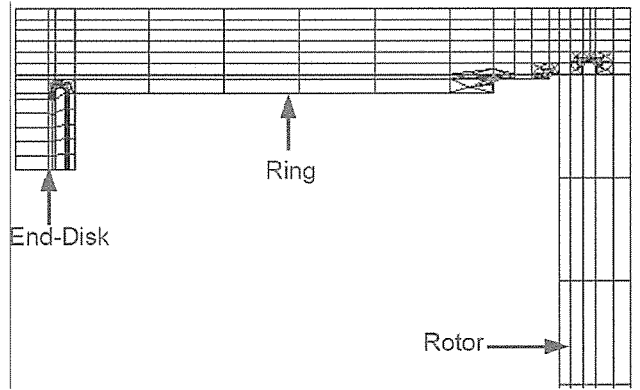


그림 7. Mesh Generation For Stress Analysis

3) User-Specified Stress Distribution

: 평가하고자하는 발전기의 타입이 전산 코드가 지원하고 있지 않은 경우에 응력 해석을 외부에서 수행하여 그 값을 입력 자료로 사용할 수 있다.

4) 응력 해석을 위한 하중 조건

: RRing-Life 프로그램에서는 Shrink-Fit, Centrifugal Force 가 있으며,

(가) 6개의 하중 조건을 사용한다.

- ① Interference Fit at Rotor
- ② Interference Fit at End DISK
- ③ Centrifugal Load With Rotor/End Disk Attached
- ④ Centrifugal Load without Rotor/End Disk Attached
- ⑤ Copper Load With Rotor/End Disk Attached
- ⑥ Copper Load Without Rotor/End Disk Attached

(나) Load Case Superposition for

- ① Standstill
- ② Normal Operation(rated speed)
- ③ Overspeed

(다) FEM Results at Pre-Defined Sections

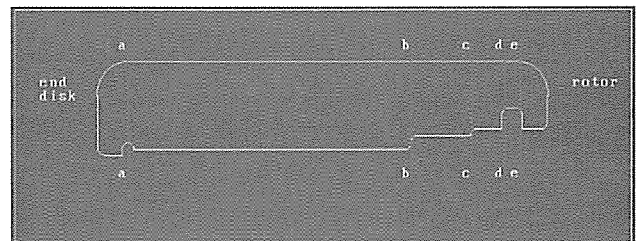


그림 8. Pre-Defined Section for FEM Results

(라) Stress Analysis Results

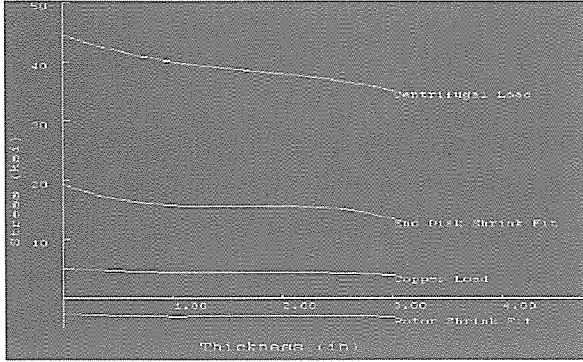


그림 9. Stress Results of Section a-a

그림 9는 각각의 Load Case에 대한 Section a-a에 대한 응력을 보여주고 있다. 그림 10은 하중 조건하에서 Crack Size와 K값과의 관계를 보여주고 있다.

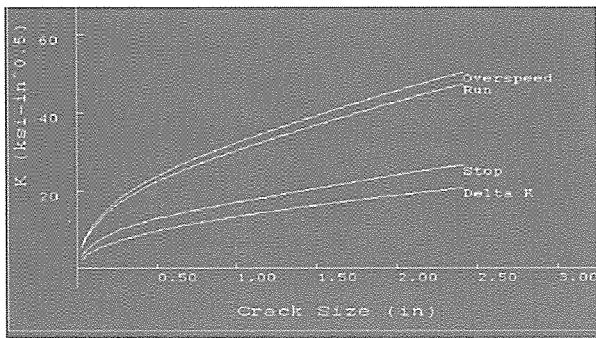


그림 10. Section a-a(End-Disk Fit)
: K VS A Results

라. RRing-Life에서 습분 노출 확률 알고리즘

: SCC 수명 평가에서 습분에 대한 영향 인자는 매우 크다. 본 프로그램에서는 가동 중, Shutdown/Turning Gear, Shutdown 기간으로 각각 구분하여 평가를 실시하게 된다.

1) 가동중

- ① $T_{ring} - T_{dewpoint}$
- ② Rotor/Stator의 냉각 방식
- ③ 기록된 습분에 노출된 사건
 - Water Sludge
 - Seal Oil Moisture
 - Inoperative H₂ Dryers
 - H₂ Cooler Leakage

④ 운전중 습분에 노출시간

$$t_{top \cdot wet} = C_3 \cdot CTI \cdot (t_{op} - t_{ke}) + t_{ke}$$

where: $C_3 = \exp(-\alpha(T_{op,ring} - T_{dewpoint}))$
 CTI = 2 for H₂O Cooler Stator
 1 for H₂ and Air Cooled Stator

1.5 for other or unknown

t_{op} = Total Operating Time

t_{ke} = Known Exposure Time

2) While on Shutdown/Turning Gear

- ① $T_{ring} - T_{dewpoint}$
- ② Type of Rotor/Stator Cooling
- ③ Forced Ventilation or Not
- ④ H₂ Dryer
- ⑤ 습분 노출시간

$$t_{tg \cdot wet} = C_4 \cdot TGI \cdot (t_{tg})$$

where : $C_4 = \exp(-\beta(T_{tg} - T_{dewpoint}))$

TGI = HDI + MPTG

HDI = 1.0 (H₂ Dryer Operative)

2.0 (Non H₂ Dryer Operative)

1.5 (Unknown)

MPTG = 0.25 (Good)

0 (Fair)

0.25 (None)

0.25 (Unknown)

3) During Shutdown

- ① Geographic Location
 - Rain/Fog Index
 - Humidity/Condensation Index
- ② Indoor/Outdoor Unit
- ③ Industrial Pollution/Coastal Location
- ④ Degree of Protection
 - During Removal
 - During Storage
- ⑤ 습분 노출시간

$$t_{r \cdot wet} = (C_1 C_2) \cdot MPI \cdot t_r + (C_1 + C_2) MPI' t_r'$$

where : C_1 = Rain and Fog Probability

C_2 = Humidity/Condensation Probability

t_r = Time Removed and in Storage

t_r' = Time in Transit to Storage

MPI = 0.1 (Cover+Temp and Climate Control)

0.3 (Cover+ Climate+Control)

0.6 (Cover Only)

0.9 (None or Unknown)

MPI' = 0.9 (Good)

0.5 (Fair)

1.0 (None or Unknown)

마. Material Properties Data Base in RRing-Life

: RRing-Life 수명 평가에서는 재질 특성을 부여 하는데 확률론적인 평가방법을 도입하고 있다. 파괴인성치는 항복강도에 의존하게 된다. 즉 항복강도의 변화에 따라 다양한 값을 가지게 된다. 같은 항복강도에서도 실제 데이터는 다양한 파괴인성치를 가지게 된다.

1) Fracture Toughness

그림 11은 항복응력에 따른 파괴인성치의 관계를 보여주고 있다. 항복강도가 180일 경우 커브 피팅한 그래프에서는 파괴인성치가 평균이다. 하지만 실제 데이터는 다양한 분산치를 보여주고 있다. 실제로

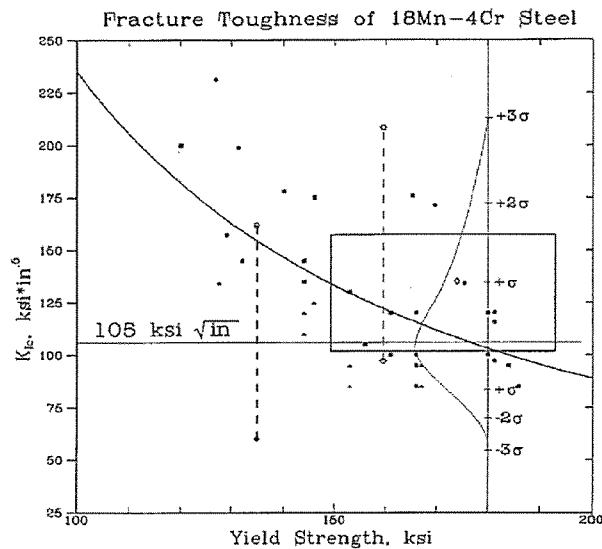


그림 11. Fracture Toughness Data

Crack Initiation in Aqueous Solutions

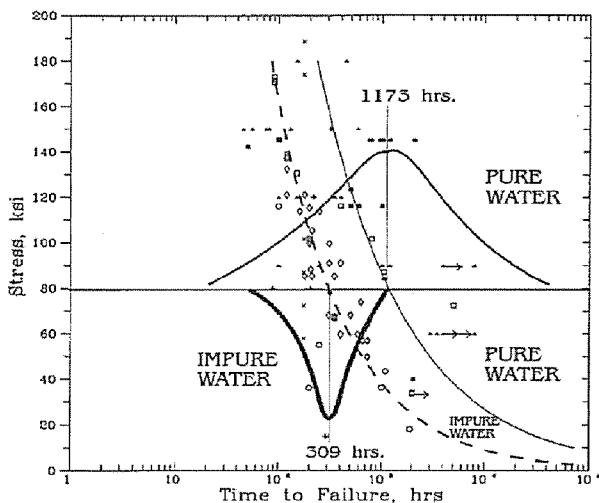


그림 12. Crack Initiation In Aqueous Solutions

재료가 사용도중 재료 열화에 의해 평균값이 아닌 평균 이하를 보일수도 있다. RRing-Life 프로그램에서는 분산치를 확률론적으로 평가하여 리테이닝 링의 수명을 평가하였다.

2) SCC Initiation

그림 12에는 응력과 파괴시간과의 관계를 보여주고 있다. Impure Water 조건에서 SCC 시작과 파괴에 이르는 시간이 짧음을 보여주고 있다. 그림 12에서 볼 수 있듯이 같은 응력 조건하에서 크랙 시작 시간이 다양하게 분포하고 있음을 알 수 있다.

3) SCC Growth Rate

그림 13은 물 중에서 SCC 성장률을 나타내는 그래프이다.

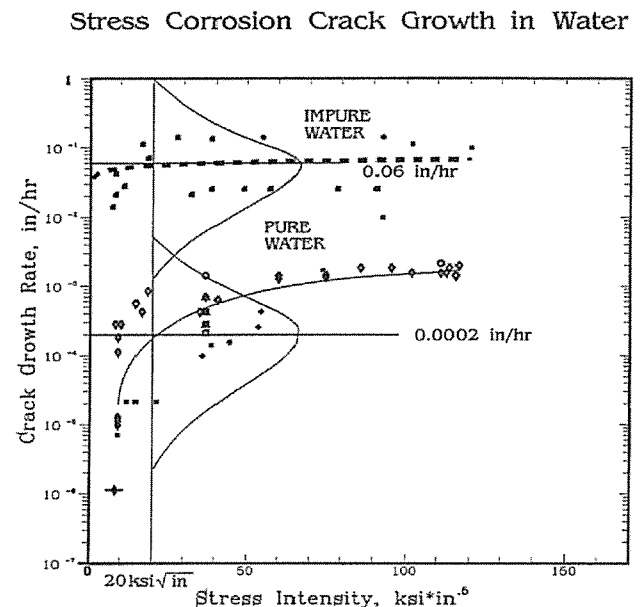


그림 13. Stress Corrosion Crack Growth In Water

바. Fracture Mechanics Flaw Models

1) RRing-Life Fracture Mechanics Methodology

그림 14 와 같이 응력 집중계수는 W.H. Banford 방정식을 사용하였다. 응력치는 크랙 발생 위치에서 응력분포를 3차 다항식으로 하여 적용하였다.

2) Flaw Model

RRing-Life 에서는 총 7개의 결함 모델을 사용하였으며 그림14에 보여주고 있다.

- ① #1 Elliptical Axial ID Crack $l/a = 10$
- ② #2 Elliptical Axial OD Crack $l/a = 10$
- ③ #3 Semi-Circular Axial ID Crack $l/a = 2$
- ④ #4 Semi-Circular Axial OD Crack $l/a = 2$

- ⑤ #5 ID/OD Full Circumferential Crack
- ⑥ #6 Longitudinal Axial ID Crack $t/r = 0.1$
- ⑦ #7 Longitudinal Axial ID Crack $t/r = 0.2$

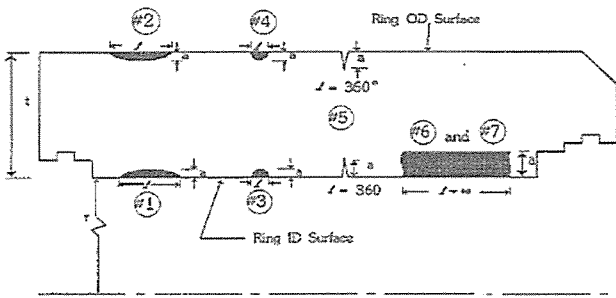


그림 14. Available Flaw Models in RRing-Life

사. Monte Carlo Iterative Scheme in RRing-Life

RRing-Life 에서의 확률론적 평가방법으로 몬테칼로 법을 사용하였다. 몬테칼로 법은 확률론적 수명평가에 많이 이용되고 있다. 1000회의 반복을 기본으로 한다. 각각의 확률수는 랜덤 넘버를 생성 시키고 크랙 생성 시간을 결정하게 된다. 또한 임계 결함 크기, 시작 시간에서 임계 크기 까지의 시간을 결정하게 된다.

1) Random Variables in Analysis

- ① RN0 - Fracture Toughness
- ② RN1 - Prob. Rain/Fog
- ③ RN2 - Prob. Humidity/Condensation
- ④ RN3 - Prob. $T_{op} - T_{dewpoint}$
- ⑤ RN4 - Prob. $T_{TG} - T_{dewpoint}$
- ⑥ RN5 - SCC Initiation

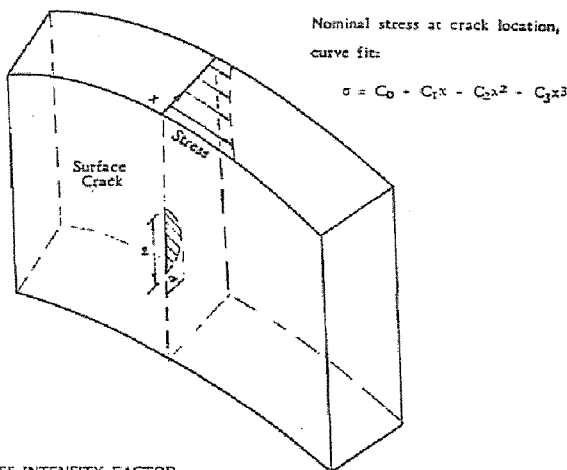


그림 15. Fracture Mechanics Methodology

- ⑦ (1-RN5) - SCC Growth

2) Analysis Results

- ① Distribution of Critical Flaw(Running, Stopped, Overspeed)
- ② Probability of SCC Initiation
- ③ Probability of SCC Growth to Critical Flaw Size
- ④ Combined Failure Probability(Initiation and Growth)

아. RRing-Life Results

1) Geographic Location

표 3은 RRing-Life 의 Geographic Location에 따른 결함 발생 확률, 성장확률, 파괴확률을 보여주고 있다. 해안 접경 지역에서 결함의 발생, 성장, 파괴에 대한 확률이 높게 나타나. SCC 수명 평가에서 습분이 수명을 결정짓는 주요한 인자임을 알 수 있었다.

표 3. RRing-Life Result (Geographic Location)

Effect of Geographic Location			
	P_{init}	P_{grow}	$P_{failure}$
*Charlotte	*23%	* 4%	* 3%
Miami	18%	3%	2%
New York	17%	0%	0%
Phoenix	9%	0%	0%
Charlotte/Coastal	79%	97%	66%

* Base Case

2) Moisture Protection

표 4는 발전기 정비 시 습분 보호가 미치는 효과를

표 4. RRing-Life Results(Moisture Protection)

Effect of Improved Moisture Protection (During Removal)			
	P_{init}	P_{grow}	$P_{failure}$
Storage Protection			
None	30%	10%	9%
* Cover Only	*23%	* 4%	* 3%
* Cover/Climate Control	18%	2%	0%
Cover/Temp & Climate Control	10%	0%	0%
Cover/Temp & Climate-Good	2%	0%	0%
REMOVAL AND TRANSIT PROTECTION			
None - 48 hrs.	* 23%	* 4%	* 3%
None - 100 hrs.	26%	10%	2%
Good - 48 hrs.	22%	4%	3%
Good 5 hrs.	17%	0%	0%

* Base Case

나타내고 있는 것으로 습분 보호책을 강화 할수록 결함의 발생, 성장 및 파괴 확률이 현저하게 감소함을 알 수 있다.

3) Effect of Ring Section

표 5는 Ring Section별 결함의 발생, 성장 및 파괴 확률을 보여주고 있다. Retaining Ring의 기하학적 형상에 의해 형상별 응력 분포를 달리하게 된다. 응력 집중이 높은 구역에서 결함의 발생, 성장 및 파괴 확률이 높음을 알 수 있었다.

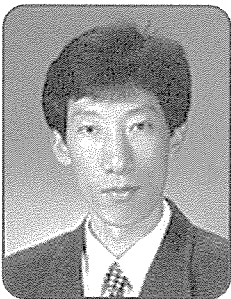
표 5. RRing-Life Results(Ring Section)

Effect of Ring Section				
		P _{init}	P _{grw}	P _{failure}
End Ring Sections New York	A-A	10%	0%	0%
	B-B	4%	0%	0%
	C-C	5%	0%	0%
Rotor End Sections	*D-D	*23%	* 4%	* 3%
	E-E	13%	4%	2%
	F-F	16%	10%	5%
	G-G	18%	0%	0%

* Base Case

전력계통 안정도 확보를 위한 발전기 무효전력 성능시험

A capability test of generator reactive power
for stability guarantee of electric power transmission



한전전력연구원
수화력발전연구소 I&C그룹
선임 연구원 이주현
Tel : (042) 865-5386

1. 서 언

우리나라의 전력계통은 전력수요의 증가에 따라 전력공급이 증대되면서 전력계통의 수송밀도가 급속하게 증가되고 있으며, 이에 따라 계통 규모가 과거에 비해 크게 확장되었고 수도권을 중심으로 송전선로의 루프화가 진행되고 있는 형편이다. 그 결과 과거에는 가능성이 비교적 낮았던 미국 등 구미 선진국형 전압안정도 문제의 출현 가능성이 점차 높아지고 있다.

2003년 8월에 발생한 북미 광역정전과 관련하여 정

부(전기위원회)는 대통령 지시사항에 따라 국내 전력계통의 광역정전을 대비하여 분야별로 점검사항을 집중 검토 중에 있으며, “발전기 무효전력 공급능력 시험”을 무효전력 및 전압제어 분야의 주요개선 추진항목으로 선정하였다.

이에 따라 전압안정도의 일차적 책무를 지고 있는 발전기의 무효전력 공급 가능량을 정확히 파악하기 위하여 무효전력 성능시험 절차서 개발 및 실제의 운전 중인 발전기를 대상으로 무효전력의 성능시험이 필요한 실정이다. 발전기 무효전력 공급량 파악을 통해 전압불안정 문제에 대한 무효전력 수급측면의 대책을 강구하여 지역적 혹은 광역정전과 같은 문제를 사전에 대처할 필요가 있다. 본 고에서는 전력계통의 안정도 확보를 위한 무효전력 성능시험의 추진내용과 진상/지상 무효전력의 제한기능 및 실제 운전 중인 발전소의 발전기를 대상으로 성능시험을 통한 무효전력의 공급가능 능력을 검증한 내용을 기술하고자 한다.