

## 국제공동연구 PARTRIDGE를 통한 확률론적 건전성 평가 기술 개발 현황

김선혜<sup>†</sup> · 박정순<sup>\*</sup> · 김진수<sup>\*</sup> · 이진호<sup>\*</sup> · 윤은섭<sup>\*\*</sup> · 양준석<sup>\*\*</sup> ·  
이재곤<sup>\*\*</sup> · 박홍선<sup>\*\*\*</sup> · 오영진<sup>\*\*\*</sup> · 강선예<sup>\*\*\*</sup> · 윤기석<sup>\*\*\*</sup> · 박재학<sup>\*\*\*\*</sup>

### Current Status of an International Co-Operative Research Program, PARTRIDGE (Probabilistic Analysis as a Regulatory Tool for Risk-Informed Decision GuidancE)

Sun Hye Kim<sup>†</sup>, Jung Soon Park<sup>\*</sup>, Jin Su Kim<sup>\*</sup>, Jin Ho Lee<sup>\*</sup>, Eun Sub Yun<sup>\*\*</sup>,  
Jun Seog Yang<sup>\*\*</sup>, Jae Gon Lee<sup>\*\*</sup>, Hong Sun Park<sup>\*\*\*</sup>, Young Jin Oh<sup>\*\*\*</sup>,  
Sun Yeh Kang<sup>\*\*</sup>, Ki Seok Yoon<sup>\*\*\*</sup> and Jai Hak Park<sup>\*\*\*\*</sup>

(Received 4 August 2013, Revised 15 August 2013, Accepted 20 August 2013)

#### ABSTRACT

A probabilistic assessment code, PRO-LOCA ver. 3.7 which was developed in an international co-operative research program, PARTRIDGE was evaluated by conducting sensitivity analysis. The effect of some variables such as simulation methods (adaptive sampling, iteration numbers, weld residual stress model), crack features(Poisson's arrival rate, maximum numbers of cracks, initial flaw size, fabrication flaws), operating and loading conditions(temperature, primary bending stress, earthquake strength and frequency), and inspection model(inspection intervals, detectable leak rate) on the failure probabilities of a surge line nozzle was investigated. The results of sensitivity analysis shows the remaining problems of the PRO-LOCA code such as the instability of adaptive sampling and unexpected trend of failure probabilities at an early stage.

**Key Words :** Failure probability(파손확률), Leak before break(파단전누설), Loss of coolant accident(냉각재상실사고), Probabilistic fracture mechanics(확률론적 파괴역학)

#### 1. 서론

1970년대 초반까지의 원전 주요기기 및 배관의 건전성은 주로 결정론적 파괴역학(deterministic fracture mechanics)을 기반으로 하는 결정론적 해석(deterministic

analysis)에 근거하여 평가되었다. 결정론적 해석방법에서는 건전성 평가의 주요 변수인 작용하중, 균열형상, 균열길이, 파괴인성(fracture toughness) 등을 특정한 확정 값으로 가정한다. 그러나 실제로 이러한 변수에는 측정 시의 불확실성 및 분산(variation)이 존재한다.

따라서 1980년대에 들어서 미국을 중심으로 원전 주요기기 및 배관에 확률론적 안전성 평가(Probabilistic Safety Assessment, PSA), 확률론적 해석방법(probabilistic analysis) 등을 적용하려는 연구가 활발히 진행되었다. 확률론적 해석방법에서는 건전성 평가 주요 변수를 불확실성 및 분산을 포함하는 확률분포(probability

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한국원자력안전기술원 기계재료평가실

E-mail : sunnykim@kins.re.kr

TEL : (042)868-0961 FAX : (042)868-0754

<sup>\*</sup> 한국원자력안전기술원

<sup>\*\*</sup> 한국수력원자력㈜

<sup>\*\*\*</sup> 한국전력기술㈜

<sup>\*\*\*\*</sup> 충북대학교 안전공학과

distribution)로 고려하며, 기기 및 배관의 안전 여유도 (safety margin)를 파손확률(failure probability)로 정량화하여 평가한다.

최근에 들어 미국 원자력규제위원회(U.S. Nuclear Regulatory Commission, US NRC)에서는 확률론적 안전성 평가 등을 통하여 얻어진 위험도 정보를 활용하여 원전 가동중 검사(In-Service Inspection, ISI)를 실시하고, 안전 중요도가 높고 파손 발생 가능성이 높은 기기 및 배관에 규제 자원을 집중하여 규제 효율성과 효과성을 높이고 있다.

미국 NRC에서는 위험도 정보 활용 규제의 일환으로 비상노심냉각계통(Emergency Core Cooling System, ECCS) 성능평가 요건 중 대형 냉각재상실사고(Large Break Loss Of Coolant Accident, LB-LOCA)의 파단 크기(break size)정의에 대한 개정을 추진하고 있다<sup>1)</sup>. 현행 ECCS 요건에서는 배관 양단파단(Double Ended Guillotine Break, DEGB) 설계를 요구하고 있는데 인성(toughness)이 큰 원전 냉각재압력경계(Reactor Coolant Pressure Boundary, RCPB)의 대형 배관에서는 실제로 대형파단이 발생할 가능성이 매우 낮다. 따라서 미국 NRC에서는 LB-LOCA에 대한 보다 현실적인 성능 평가를 위하여 LB-LOCA에 해당하는 배관파단크기 결정 시 확률론적 해석에 기반한 전문가 경험 추출(elicitation) 방법을 적용할 수 있도록 요건을 개정하고 있다<sup>2)</sup>.

한편, 1980년대 초반부터 원전냉각재압력경계 일부배관의 양단파단 설계를 배제하기 위하여 파단전 누설(Leak Before Break, LBB) 개념이 적용되어 왔다. LBB개념은 배관에 수직하중, 응력부식균열 등이 발생할 가능성이 낮음을 입증하여야만 적용이 가능하다<sup>3)</sup>. 그러나 2000년대에 들어 LBB 개념이 적용된 배관의 이종금속용접부에서 일차수응력부식균열(Primary Water Stress Corrosion Cracking, PWSCC) 발생이 보고됨에 따라 PWSCC 발생 배관의 파단 가능성에 대한 평가와 더불어 새로운 LBB 평가절차 개발이 요구되어지고 있다.

최근에는 미국을 중심으로 국제공동연구를 구성하여 전술한 LB-LOCA 파단크기 제정의 및 주요 손상기구가 존재하는 배관의 파손확률이 극히 낮음(extremely low)을 입증하기 위한 확률론적 해석방법에 대한 연구가 진행되고 있다. 미국 NRC은 ECCS 요건 개정을 위한 기초연구인 Large Break LOCA 프로그램을 통하여

확률론적 건전성 평가코드인 PRO-LOCA(PRObabilistic-Loss Of Coolant Accident)를 2002년에 개발하였다. PRO-LOCA 코드는 2006년부터 3년간 진행된 MERIT Program(Maximizing Enhancements in Risk Informed Technology, '06~'09)<sup>4)</sup>을 통하여 대폭 개선되었으며, 2012년부터 시작된 PARTRIDGE program(Probabilistic Analysis as a Regulatory Tool for Risk-Informed Decision Guidance, '12~'14)<sup>5)</sup>을 통하여 지속적인 개선과 검증작업이 추가적으로 이루어질 예정이다. 더불어 미국 NRC 및 전력연구소(Electric Power Research Institute, EPRI)에서 2009년부터 진행하고 있는 xLPR program(eXtremely Low Probabilistic of Rupture, '09~'16)<sup>6)</sup>에서는 LBB 평가의 불확실성을 고려하기 위하여 원자로냉각재계통(Reactor Coolant System, RCS) 측 배관 파손확률 예측을 위한 모듈화된 파손확률 평가코드인 xLPR 코드를 개발하고 있다.

하지만 현재까지 개발된 PRO-LOCA 및 xLPR 코드는 수렴성 및 품질보증(Quality Assurance, QA) 절차 등의 문제로 인해 연구목적으로만 활용되고 있다. 따라서 본 연구진은 국제공동연구 PARTRIDGE 프로그램에 참여하여 확률론적 건전성 평가코드인 PRO-LOCA 및 xLPR의 제반 기술을 확보하고, LBB 재입증, LB-LOCA 제정의 등의 실제 원전 현안문제에 적용하기 위한 방안을 모색하고 있다. 본 논문에는 국제공동연구 PARTRIDGE의 진행현황을 기술하고 기초적인 연구로써 수행한 PRO-LOCA 코드의 주요 변수에 대한 민감도 분석 결과를 제시하였다.

## 2. 국제공동연구 PARTRIDGE 현황

### 2.1 PARTRIDGE 프로그램 개요

PARTRIDGE 프로그램은 5개국(대만, 미국, 스웨덴, 캐나다, 한국)의 총 13개 기관이 참여하여 총 3년간 수행되는 국제공동연구로써 미국 NRC에서 후원하고 Battelle 연구소에서 주관하고 있다. 한국에서는 국내 3개 기관(KINS, KHNP, KEPCO E&C)이 컨소시엄을 구성하여 PARTRIDGE 프로그램에 참여하고 있다. PARTRIDGE 프로그램의 연구목적은 Large Break LOCA 및 MERIT 프로그램을 통하여 개발된 배관 파손확률 평가코드인 PRO-LOCA를 개선하고, 미국 NRC와 EPRI에서 공동 개발한 파손확률 평가코드인 xLPR(eXtremely Low Probability of Rupture)의 품질보증

(Quality Assurance, QA) 및 검증작업을 수행하는 것이다.

PARTRIDGE 프로그램의 각 참여기관은 손상기구 및 파도운전조건, 재료물성 등 주요 변수의 변화에 따른 PRO-LOCA 코드의 파손확률 예측 신뢰도를 검증하기 위하여 다자간의 민감도 분석(sensitivity analysis)을 수행하고, 그 결과를 비교·분석하여 PRO-LOCA 코드의 문제점을 개선하고 있다. 한국 측에서는 민감도 분석과 더불어 현물기여(in-kind contribution)의 일환으로 표면균열(surface crack)에서 관통균열(through-wall crack)로 변환되는 단계의 균열이 존재하는 배관에 대한 정확한 파손확률 및 균열성장거동을 평가하기 위한 공학적 예측기법을 개발 중에 있으며, 개발될 예측기법은 추후 PRO-LOCA 4.0 버전에 반영될 예정이다.

## 2.2 PARTRIDGE 프로그램 진행 현황

2012년 4~5월 2차례에 걸쳐 PRO-LOCA 3.0 베타 버전에 대한 다자간 민감도 분석을 수행하였으며, 2012년 6월 개최된 제1차 TAG 회의에서 민감도 분석 결과가 논의되었다. 2012년 11월에는 PRO-LOCA 3.7 버전이 개발되었으며, 사실적인 입력 데이터를 고려한 민감도 분석을 통하여 평가코드에 대한 검증을 진행하였다. 2012년 12월에 진행된 제1차 전화회의에서는 PRO-LOCA 3.7 버전 개선 및 변경사항과 PRO-LOCA 4.0 버전 개선방안이 논의되었다. 현재, 한국 측은 PRO-LOCA 4.0 버전에 반영될 표면균열에서 관통균열로 변환되는 단계의 균열 평가기법을 개발 중에 있으며, 2013년 10월 중에 전술한 평가기법의 개발을 완료할 예정이다. Battelle 연구소 측은 2013년 11월을 목표로 PRO-LOCA 4.0 베타버전을 개발중에 있으며, 다자간의 민감도 분석 및 검증을 거친 후 최종적으로 2014년 1월에 PRO-LOCA 4.0 최종버전의 개발을 완료할 예정이다.

## 2.3 PRO-LOCA 코드 개요 및 구성

LB-LOCA 파단크기 재정의 시 천이파단크기(Transient Break Size, TBS)를 결정하기 위해서는 전문가 경험 추출을 통하여 배관의 파단크기 별 누설 및 파손확률을 계산해야 한다. PRO-LOCA 코드는 전문가 경험 추출 결과의 신뢰성을 높이기 위하여 개발되었다. PRO-LOCA 코드는 피로, PWSCC, 입계응력부식균열(Intergranular Stress Corrosion Cracking, IGSCC)

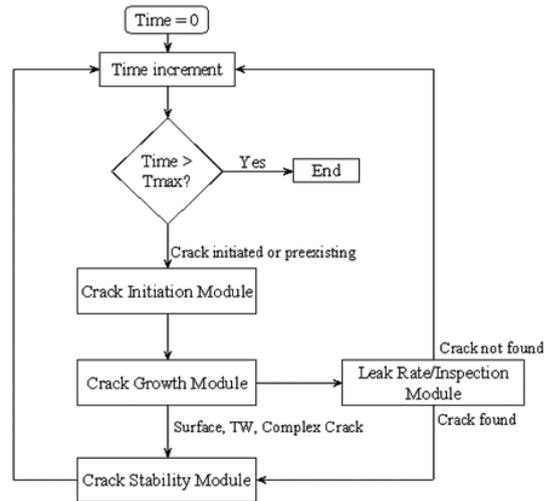


Fig. 1 Time loop flow chart for PRO-LOCA code

등의 손상기구를 고려하며, 총 7종류의 확률밀도함수(probability density function) 분포형태(constant, uniform, normal, log-normal, Weibull, exponential, extreme value type distribution)로 주요 변수를 고려할 수 있다. PRO-LOCA 코드는 Fig. 1과 같이 Crack Initiation Module, Crack Growth Module, Crack Stability Module, Leak Rate/Inspection Module로 구성되어 있다. PRO-LOCA 코드의 균열 안정성 평가에는 DPZP(Dimensionless Plastic Zone Parameter) 해석방법 및 J-T 해석방법이 사용되며, 누설율은 SQUIRT 코드를 통해 결정된다.

PRO-LOCA 코드를 통하여 계산할 수 있는 확률론적 해석 결과로는 관통균열 생성확률, 파단크기 별 배관 파손확률, 배관 파단확률 등이며, 결함 및 누설 탐지의 영향을 고려하여 파손확률을 계산할 수 있다.

현재 PARTRIDGE 프로그램을 통하여 개발되고 있는 PRO-LOCA 코드 4.0 버전에는 다음의 사항이 개선되어 반영될 예정이다.

- 그래픽 사용자 인터페이스(GUI)
- 적응적 표본추출법(Adaptive Sampling)
- 조합하중(압력 및 굽힘모멘트) 하에서의 새로운 균열열림변위(Crack Opening Displacement, COD) 예측식
- 표면균열에서 관통균열로 변환되는 단계에서의 결함 평가기법
- 균열형상을 고려하여 0.1~1.0 gpm 범위에서 활용할 수 있는 누설률 평가 변환 DATA

- 임의의 잔류응력분포를 평가할 수 있는 응력확대 계수(stress intensity factor) 계산용 범용 가중치함수(universal weight function)

**2.4 xLPR 코드 개요 및 구성**

미국 NRC 및 EPRI가 공동개발 중에 있는 xLPR 코드는 RCS 측 파손 확률 예측을 위한 모듈화된 확률론적 평가코드이다. 미국 NRC는 확률론적 평가 프로그램 개발 전문그룹인 Goldsim Group 및 Oak Ridge National Lab.과 EPRI는 SI(Structural Integrity)와 협력하여 xLPR 코드를 개발 중에 있다.

xLPR 1.0 버전은 가압기 밀림관 노즐 이중금속용접부를 대상으로 용접잔류응력과 PWSCC를 고려한 배관 파손확률 평가가 가능하도록 개발되었다(2011.3). 1.0 버전에서는 모듈화 소프트웨어 플랫폼 결정을 위하여 Goldsim 소프트웨어 플랫폼을 활용한 버전과 SI 소프트웨어 플랫폼을 활용한 버전이 각각 개발되었다.

xLPR 1.0 버전은 PWSCC를 손상기구로 고려하며, Fig. 2와 같이 Crack Initiation Module, Crack

Coalescence Module, Crack Growth Module, Crack Stability Module, Crack Opening Displacement Module, Inspection /Leak Rate Module 등으로 구성되어 있다. xLPR 1.0 버전의 균열 안정성 평가에는 붕괴해석 및 J-T 해석방법이 사용되며, 누설율은 SQUIRT 코드를 통해 결정된다. xLPR 코드를 통하여 계산할 수 있는 확률론적 해석 결과로는 표면균열 및 관통균열 생성 확률, 파단크기 별 배관 파손확률 등이 있다.

xLPR 2.0 버전은 RCS 배관까지 평가대상을 확장하고 LBB 규제지침 개발에 활용할 수 있도록 Goldsim 소프트웨어 플랫폼을 기반으로 2013년까지 개발을 완료할 예정이다. 더불어 xLPR 3.0 버전은 원자로용기, 증기발생기 등에 확대 적용할 수 있도록 평가대상을 원자로냉각재압력경계까지 확장하여 2015년까지 개발을 완료할 예정이다.

**3. PRO-LOCA 코드 민감도 분석**

**3.1 민감도 분석 개요**

PWR 원전 밀림관 노즐 이중금속용접부의 PWSCC 문제에 대한 실제 데이터를 고려하여 PRO-LOCA 3.7 버전의 주요 변수에 대한 민감도 분석을 수행하였다. PWSCC 문제를 모사하기 위하여 밀림관 노즐 Alloy 182 용접부에 결함을 가정하였고, 밀림관 노즐 내벽에 작용하는 15.51 MPa의 운전압력과 315.5℃의 운전온도를 고려하였다. 이외의 해석에 고려된 밀림관 노즐 및 결함 형상, 재질과 관련한 주요 물성치를 Table 1에 정리하였다. Table 1에 제시되어 있는 바와 같이 일부 변수들은 Lognormal 확률밀도함수로 해석에 고려되었다.

본 연구에서 주요 변수가 파손확률 계산 결과에 미

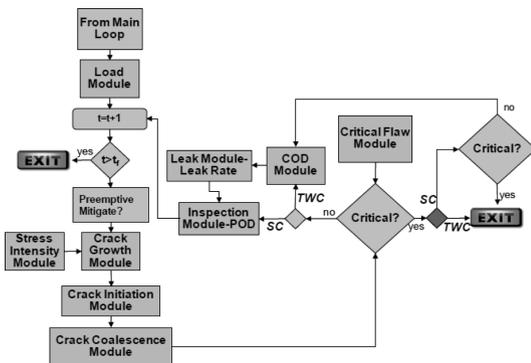


Fig. 2 Time loop flow chart for xLPR code ver. 1.0<sup>6)</sup>

Table 1 Main parameters for sensitivity analysis

Diameter [mm]	381	Fracture toughness, J <sub>IC</sub> [MPa · mm]	482.7/1.78 (Log-normal)
Thickness [mm]	40.132	J-R curve, C [-]	260.1/1.62 (Log-normal)
Young's Modulus [GPa]	177.1	J-R curve, m [-]	0.612
Yield Strength [MPa]	372/90.1 (mean/std dev, Log-normal)	Fatigue crack growth coefficient [m/cycle]	0.003
Ultimate strength [MPa]	583/58 MPa (Log-normal)	Exponent for fatigue crack growth	3.5
Ramberg-Osgood, n [-]	4.322	Initial half crack length [mm]	3/0.15 (Log-normal)
Ramberg-Osgood, F [-]	915.2/82.3 (Log-normal)	Initial crack depth [mm]	1.5/0.075 (Log-normal)

치는 영향을 분석하기 위하여 총 30 Cases의 해석을 진행하였다. 분석된 주요 변수는 시뮬레이션 방법, 결합 특성, 하중/운전 조건, 검사/누설률 등 크게 4가지 항목으로 분류된다.

#### A. Simulation Method

Sampling method, Iteration numbers, POD (probability of detection) curve, Weld residual stress module

#### B. Flaw

Crack initiation-arrival rate, Maximum numbers of cracks, Initial flaw size, Crack opening area, Fabrication flaws

#### C. Loading/operating conditions

Temperature, Primary bending stress, Weld residual stress, Earthquake strength, freq. and probability

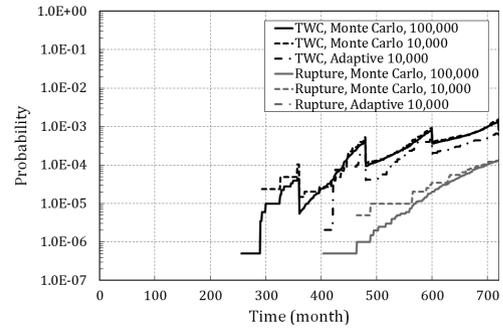
#### D. Inspection/Leak Rate

Number of inspection, Inspection interval, Detectable leak rate

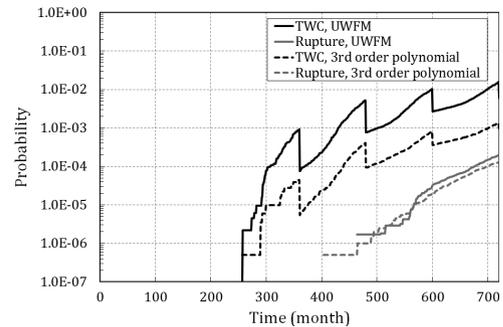
### 3.2 시뮬레이션 방법의 영향

PRO-LOCA 3.7 버전부터 추가된 적응적 표본추출법은 관심 영역에 집중하여 표본을 추출하며, 표본 지점의 복잡성에 비례하여 표본의 밀도를 높이는 방법이다. 이 방법은 정밀도가 높은 반면 인위적인 조정이 필요하다. Fig. 3(a)는 적응적 표본추출법과 Monte Carlo 표본추출법을 각각 고려하여 계산한 관통균열 발생확률 및 파단확률이다. 두 표본추출법을 이용하여 동일하게  $10^4$ 회의 반복계산을 수행한 결과, Monte Carlo 표본추출법을 고려했을 경우에 파손확률이 모든 기간에 걸쳐 크게 나타났으며, 파손확률의 경향도 상대적으로 안정적이었다. 더불어 Monte Carlo 표본추출법을 고려하여  $10^5$ 회 반복계산을 수행한 결과, 초기의 파손확률은  $10^4$ 회 반복계산 결과 보다 낮았으나 일정 기간 이후부터는 유사한 수치를 나타내었다. 단,  $10^5$ 회 반복계산 결과가 보다 안정적이었을 뿐만 아니라 이른 단계에서의 매우 낮은 파손확률도 예측하였다.

PRO-LOCA 3.7 이전 버전에는 3차 또는 4차 다항식으로 두께방향 용접부 잔류응력 분포를 정의하였으나, 특정 조건에서 비현실적으로 큰 잔류응력을 모사하는 것이 문제였다. 범용 가중치 함수는 전술한 3, 4차 다항식 모델의 문제를 해결하기 위해 3.7 버전에 추가되었다.



(a) Sampling method and Iteration number (w/crack detection)



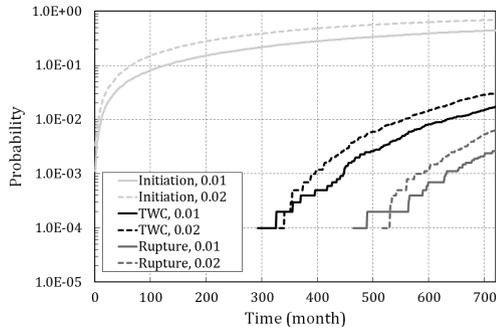
(b) Weld residual stress module (Monte Carlo, w/ crack detection)

Fig. 3 Effects of Simulation method

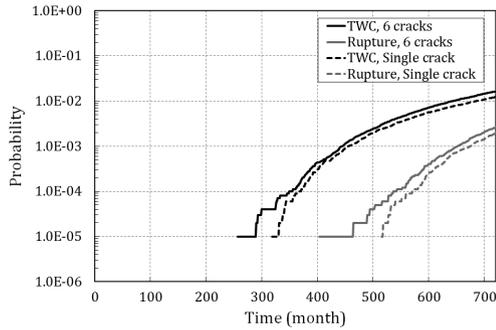
Fig. 3(b)는 범용 가중치 함수와 3차 다항식을 각각 고려하여 용접부 잔류응력 분포를 정의한 경우의 파손 확률 계산결과이다. 단 이 경우의 3차 다항식 모델은 용접부 잔류응력 분포를 현실적으로 모사하였다. 관통균열 발생확률은 범용 가중치 함수를 고려한 경우에 평균 10배 이상 컸으나, 파단확률은 상대적으로 유사한 값을 나타내었다. 즉, 범용 가중치 함수를 이용하여 잔류응력의 상한값을 제한할 지라도 보수적인 평가가 가능함을 보여준다.

### 3.3 결합 특성의 영향

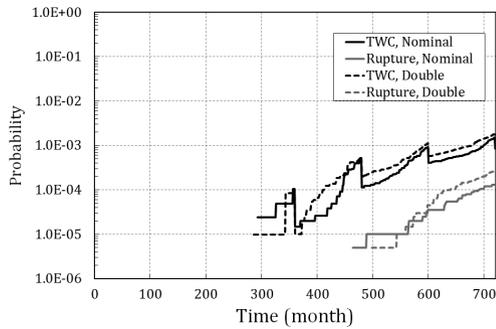
PRO-LOCA 3.7버전에 반영된 균열생성모델 중 연간 발생하는 결합 개수로 균열 생성을 정의하는 Poisson arrival rate 모델의 arrival rate가 파손확률 결과에 미치는 영향을 분석하였다. 이때 arrival rate는 연간 1인 치 당 생성되는 결합 개수이다. Fig. 4(a)에 제시한 바와 같이 arrival rate가 0.02 cracks/year일 경우의 파손 확률 결과가 일부 초기구간을 제외하고는 0.01 cracks/year일 경우보다 크게 나타났다. 단, 일부 초기구간에



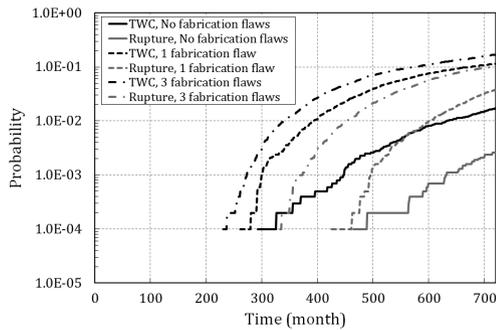
(a) Arrival rate (w/ crack detection)



(b) Max. no. of cracks (w/o crack detection)



(c) Initial flaw size (w/ crack detection)



(d) Fabrication flaw (w/ crack detection)

Fig. 4 Effects of flaw features

서 결함 탐지의 영향으로 상이한 경향이 발생하는 것으로 판단되나 원인에 대한 상세한 추가 분석이 필요하다.

Fig. 4(b)는 최대 결함의 개수가 파손확률 결과에 미치는 영향을 분석한 결과이다. 결함 탐지가 없을 경우, 최대 결함의 개수가 클수록 초기구간에서의 파손확률이 크게 나타났으나, 시간이 지남에 따라 파손확률의 차이가 감소하는 것을 확인하였다.

Fig. 4(c)는 초기 결함의 크기가 파손확률 결과에 미치는 영향을 분석한 결과이다. Table 1에 정리한 결함 길이 및 깊이보다 2배 큰 결함을 고려했을 경우에 일부 초기구간을 제외하고 파손확률 결과가 크게 나타났다. 단, 일부 초기구간에서 상이한 경향이 발생하는 원인에 대한 추가적인 분석이 필요하다.

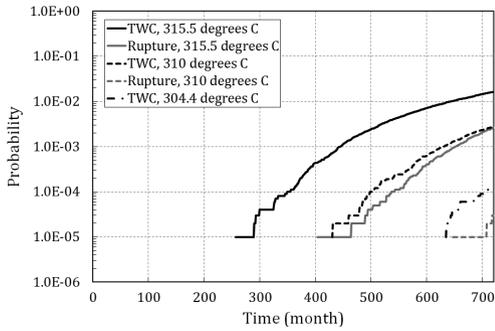
Fig. 4(d)는 제작 결함(fabrication flaw)이 파손확률에 미치는 영향을 분석한 결과이다. PRO-LOCA 상에서 제작 결함은 결함 생성확률에 반영되지 않도록 정의되었다. 제작 결함(1/2 결함길이-Lognormal 확률분포 평균 3mm, 표준편차 0.15mm, 결함깊이-Lognormal 확률분포 평균 1.5mm, 표준편차 0.075mm)이 고려된 경우의 파손확률은 전 기간에 걸쳐 제작 결함이 고려되지 않은 경우보다 크게 나타났으며, 이러한 경향은 제작 결함의 개수가 많을수록 뚜렷하게 나타났다. 더불어 제작 결함은 본 절에서 고려한 어떤 요인보다 파단확률의 급격한 증가를 유발하였다. 특히 3개의 제작 결함이 고려된 경우의 파단확률은 시간이 지남에 따라 관통균열 발생확률에 근접하게 증가하는 것을 확인하였다.

### 3.4 하중/운전 조건의 영향

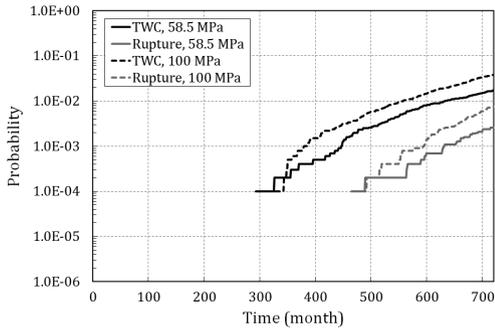
Fig. 5(a)는 운전온도가 파손확률에 미치는 영향을 분석한 결과이다. 온도가 약 5°C 감소함에 따라 관통균열 발생확률 및 파단확률이 크게 감소하는 것을 확인하였으며, 온도가 약 10°C 감소한 경우에는 파단확률이 극히 낮아짐을 확인하였다.

Fig. 5(b)는 일차급힘응력이 파손확률에 미치는 영향을 분석한 결과이다. PRO-LOCA 상에서 일차급힘응력은 원주방향을 따라 일정하게 작용한다고 가정된다. 일차급힘응력이 2배 증가함에 따라 파손확률이 일부 초기구간을 제외하고 소폭 증가하였다. 단 일부 초기구간에서 상이한 경향이 발생하는 원인에 대한 추가적인 분석이 필요하다.

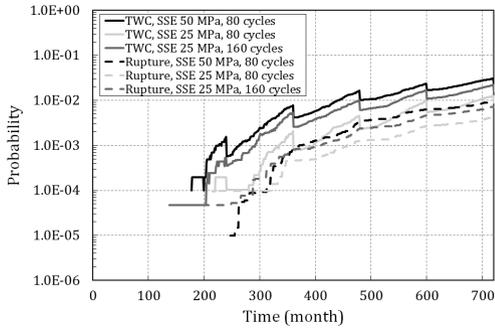
Fig. 5(c)는 지진하중 크기 및 주기가 파손확률에 미치는 영향을 분석한 결과이다. PRO-LOCA 상에서 지



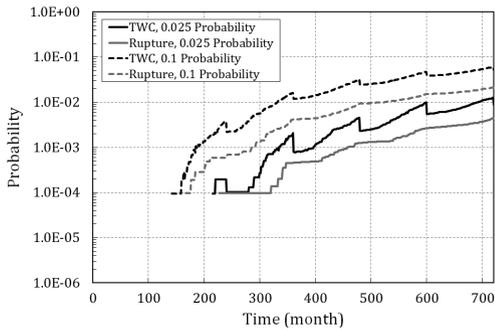
(a) Temperature (w/o crack detection)



(b) Primary bend stress (w/o crack detection)



(c) Earthquake magnitude and frequency (w/ crack detection)



(d) Earthquake probability (w/ crack detection)

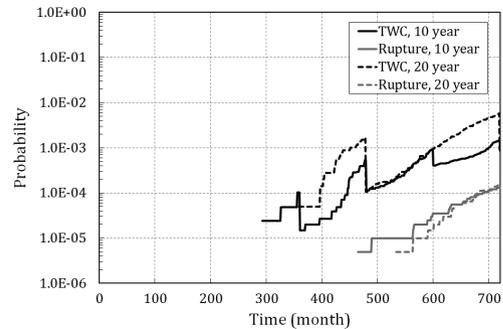
**Fig. 5** Effects of loading and operating conditions

진하중은 일정 응력진폭을 갖는 완전 교번하중으로 가정되며, 중첩의 원리 하에서 정상운전 하중에 더해진다. 안전정지지진(Safety Shutdown Earthquake, SSE)으로 인한 응력진폭 및 주기가 25MPa, 80 cycles인 경우와 50MPa, 80 cycles인 경우의 파손확률을 비교해보면, 응력진폭이 2배 증가함에 따라 전 기간에 걸쳐 파손확률이 소폭 증가하였다. 응력진폭 주기가 160 cycles로 2배 증가한 경우에도 파손확률이 전 기간에 걸쳐 파손확률이 소폭 증가하였으나 증가폭은 응력진폭의 영향으로 인한 증가보다 작았다.

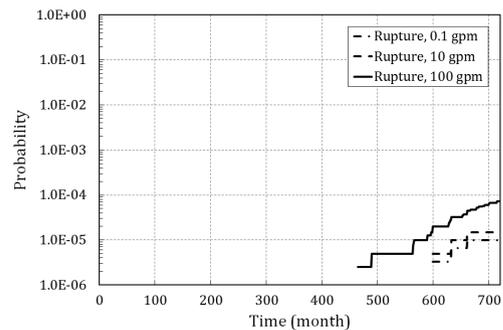
Fig. 5(d)는 연간 지진발생확률이 파손확률에 미치는 영향을 분석한 결과이다. 지진발생확률이 4배 증가함에 따라 전 기간에 걸쳐 관통균열 발생확률 및 파단확률이 상당크기 증가하였다.

### 3.5 검사/누설율의 영향

PRO-LOCA 3.7 이전 버전에서는 임의의 난수(random number)를 생성하고 이 값이 특정 시간의 결합깊이에 해당하는 검출확률(Probability of Detection, POD)보다 작은 경우에 결합이 검출되었다고 판단하고 계산을



(a) Inspection interval (w/ crack detection)



(b) Detectable leak rate (w/ crack detection)

**Fig. 6** Effects of Inspection and leak rate

중요하였다. 그러나 이러한 방법은 검사의 영향을 분별하기 위해 많은 반복계산을 요구하므로 비효율적이었다. PRO-LOCA 3.7 버전부터는 효율적인 계산을 위하여 결함이 검출되지 않을 확률(Probability of Non-Detection, PoND)를 이용하는 새로운 방법을 적용하였다.

Fig. 6(a)는 검사주기가 파손확률에 미치는 영향을 분석한 결과이다. 20년 주기로 검사를 수행한 경우에 일부 초기구간을 제외하고 파손확률이 소폭 상승하였다. 단 파단확률의 경우에는 초기구간에서 상이한 경향이 나타나므로 이에 대한 추가적인 분석이 필요하다.

PRO-LOCA 상에서 누설율은 SQUIRT 코드를 이용하여 계산되는데, 누설율이 큰 경우 수렴문제가 발생할 가능성이 있다. Fig. 6(b)는 검출 가능한 누설율이 파단확률에 미치는 영향을 분석한 결과이다. 작은 크기의 누설이 검출 가능한 경우(0.1 gpm)가 그렇지 않은 경우에 비하여 파단확률이 작게 나타났다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 국제공동연구 PARTRIDGE를 통하여 개발하고 있는 확률론적 파손확률 평가코드 PRO-LOCA를 분석하고, PWR 원전 밀림관 노즐 이중급속 용접부의 PWSCC 문제에 대한 실제 데이터를 고려하여 PRO-LOCA 3.7 버전의 주요 변수에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 민감도 분석을 통하여 도출한 고찰사항은 다음과 같다.

- 시뮬레이션 방법의 영향  
적용 표본추출법의 경우, 파손확률을 비보수적이고 불안정적으로 예측할 가능성이 있으므로, 인위적인 조정 파라미터에 대한 추가적인 평가 및 개선작업이 필요하다. 범용 가중치 함수 기반의 용접부잔류응력 모델은 현실적인 잔류응력 분포를 모사하나, 파손확률을 과소평가할 가능성이 있으므로 이에 대한 추가적인 분석이 필요하다.
- 결함 특성의 영향  
Arrival rate, 초기 결함크기의 민감도 분석 결과, 일부 초기구간에서 일반적인 경향과 다른 파손확률 양상이 나타나므로 이에 대한 추가적인 분석이 필

요하다. 더불어 파손확률은 제작결함 조건에 매우 민감하므로 제작 결함의 상세조건을 정확하게 정의해야 할 필요가 있다고 판단된다.

- 하중/운전 조건의 영향  
일차 굽힘응력의 민감도 분석 결과, 일부 초기구간에서 일반적인 경향과 다른 파손확률 양상이 나타나므로 이에 대한 추가적인 분석이 필요하다.
- 검사/누설율의 영향  
검사주기의 민감도 분석 결과, 일부 초기구간에서 일반적인 경향과 다른 파손확률 양상이 나타나므로 이에 대한 추가적인 분석이 필요하다. 더불어, 3.7 버전에 변경된 검사모델의 계산 효율성 개선 정도를 이전 버전 계산속도와의 비교를 통하여 분석할 필요가 있다.

#### 후 기

본 연구는 원자력안전위원회 원자력안전관리기술개발사업(원전 주요기기 동적영향 및 파손 확률 평가 규제기술 개발)의 일환으로 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. KINS, 2007, "Background and issues on risk-informed changes to 10CFR50.46 (ECCS acceptance criteria) of US NRC," KINS/RR-404.
2. US NRC, 2005, "Estimating loss-of-coolant accident (LOCA) frequencies through the elicitation process," NUREG-1829.
3. US NRC, 2007, "Leak before break evaluation procedures," SRP 3.6.3.
4. Scott, P., Kurth, R., Cox, A., Olson, R. and Rudland, D., 2010, "Development of the PRO-LOCA probabilistic fracture mechanics code" MERIT final report, 2010:46.
5. Battelle, 2009, "PARTRIDGE (Probabilistic Analysis as a Regulatory Tool for Risk Informed Decision Guidance)," Technical proposal OP53671.
6. xLPR Computational Group, 2011, "xLPR version 1.0 report."