

**Risk-Informed ISI에서 배관  
세그먼트별 최소 검사량 결정 방법**

**The method for determination of the minimum number  
of locations in each segment to be examined in Risk-Informed ISI**

홍승열, 김명기, 정백순, 박치용, 오해철, 서미로

한전전력연구원  
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

원자력발전소 배관 가동중검사(ISI; Inservice Inspection)의 최적화를 위하여, 현재의 ASME Section XI 검사부위 선정 방법을 대신할 수 있는 위험도 정보를 이용한 배관 가동중검사 부위 선정 기술(RI-ISI; Risk-Informed In-service Inspection)을 개발하였으며, 국내 적용을 위한 시범연구를 올진 4호기를 대상으로 수행 중에 있다. WOG (Westinghouse Owners Group) RI-ISI 방법론에서는 검사 대상 배관 세그먼트별 최소 검사량 결정을 위하여 통계적인 모델(Perdue model)을 활용하고 있다. 먼저 Structural Element Selection(SES) matrix를 이용하여 Perdue 모델 평가 대상 배관 세그먼트를 선정하고, Perdue 모델을 활용하여 일정 수준의 검사 신뢰도를 확보하기 위하여 몇 개의 용접부위에 대하여 검사를 수행하여야 하는 지를 결정한다. 본 논문에서는 올진 4호기 Risk-Informed ISI 평가의 일환으로 수행한 Perdue Model을 이용한 세그먼트별 최소 검사량 결정 방법에 대하여 기술하고자 한다.

Abstract

To optimize the inservice inspection of piping of nuclear power plants, which is performed currently according to ASME section XI requirements, risk-informed ISI method has been developed in U.S.A and the pilot project for the application of RI-ISI method to piping ISI for Ulchin 4 is being performed. In WOG RI-ISI method, the statistical model is used to assist in selecting the minimum number of locations to be examined to ensure that an acceptable level of reliability is achieved in the piping of interest. First of all, piping segments which should be evaluated by using Perdue model are categorized in SES matrix and Perdue model are used to determine the minimum number of locations to be examined. This paper describes the method how to determine the minimum number of locations to be examined by using a statistical model (Perdue model) in process of RI-ISI program development of Ulchin Unit 4.

## I. 서론

현재 미국의 원자력산업계 및 규제기관을 중심으로 원자력발전소의 운영 및 정비에 위험도 정보를 이용하는 기술 (Risk-Informed Technology)을 폭넓게 활용하고 있고, 국내에서도 기존에 수행된 몇몇 위험도기반 기술적용 사례를 비롯해서, 적용이 점차 활성화 되는 경향이다. 현재 미국 원전에서는 위험도 정보기반 응용기술을 배관 가동중검사 부위 선정에 적용하는 RI-ISI( Risk-Informed Inservice Inspection)가 가장 폭 넓게 적용되고 있다. 위험도정보를 이용한 배관 가동중검사(RI-ISI)는 발전소 안전성을 유지하면서 인적 및 기술자원을 효과적으로 이용함으로써 가동중검사를 최적화할 수 있어 각광을 받고 있다. 이 방법은 배관의 검사부위를 선정하는 데 있어서 배관 부위별 파손 시 위험도를 평가해서 고 위험도 배관에 검사를 집중함으로써 현재의 ASME Section X1 에 의한 검사보다 인적 물적인 자원을 효율적으로 활용할 수 있는 방법이다. 본 논문에서는 RI-ISI 방법론의 국내 적용을 위하여 채택한 WOG 방법론에서 적용하고 있는 통계적 모델(Perdue 모델)을 활용한 배관 세그먼트별 최소 검사량 선정 방법을 소개하고자 한다.

## II. WOG Risk-Informed ISI 방법론

WOG RI-ISI 프로그램 개발은 그림 1에 기술된 과정을 단계별로 수행하고 있다.

### ○ 범위 선정 (Scope Definition)

RI-ISI 프로그램의 첫 번째 단계는 평가 대상 계통을 결정하는 것이다. 미국 NRC에서는 Full Scope 뿐만 아니라 Partial Scope에 대해서도 Reg. Guide 1.174의 판정기준을 만족할 경우 승인해 주고 있으며, 분석 범위는 사업자가 경제적인 측면을 고려하여 결정하고 있다. Class 1,2,3 및 Non-code class 까지를 포함하는 Full scope과 class 1 또는 class 1 & 2 기기를 대상으로 하는 Partial scope이 있다.

### ○ 배관 세그먼트 분류 (Segment Definition)

분석범위에 포함되어 있는 모든 용접부에 대하여 평가를 수행하는 것은 거의 불가능하므로, 위험도 관점에서 비슷한 배관 부위를 묶어서 평가를 수행하고 있다. 세그먼트를 분류하는 기준은 다음과 같다.

- 배관이 파손되었을 경우 위험도 평가 관점에서 같은 사고결말을 갖는 배관부위
- 흐름이 분기 또는 합쳐지거나, 배관 크기가 변경되는 배관부위
- 배관이 파손되었을 경우 격리될 수 있는 배관부위

### ○ 사고결말 분석 (Consequence Evaluation)

배관 압력경계파손으로 인한 안전성 관련 사고결말을 정성적으로 평가한 후, PSA 모델을 이용하여 노심손상빈도(CDF: Core Damage Frequency)와 대량조기방출(LERF: Large Early Release Frequency) 확률값으로 정량화한다. 배관 압력경계 파손으로 인한 피해는 직접피해(Direct Effects)) 및 간접피해(Indirect Effects)로 구분하여 평가한다.

직접피해는 파손된 배관으로 인한 초기사건 또는 발전소 안전정지에 필수적인 계통의 기능상실 등이고, 간접피해는 파손된 배관으로 인해 야기된 내부침수, Pipe Whip, Jet Impingement와 같이 중요한 전기 기기 등의 기능상실로 야기되는 사고결말이다.

○ 배관파손확률평가 (Piping Failure Probability Assessment)

배관의 분절화(Segment Definition) 및 사고결말 분석(Consequence Evaluation)이 끝나면, 배관파손확률 평가를 수행한다. Westinghouse에서 개발한 배관파손확률 평가 전산코드인 SRRA (Structural Reliability and Risk Assessment) 를 사용하며, 발전소 설계, 운전, 보수 등 각종 정보에 근거하여 배관파손확률평가를 수행한다.

○ 위험도 분석 (Risk Evaluation)

배관 세그먼트의 위험도 관점에서의 상대적인 중요도를 결정하는 과정이다. 배관파손 시의 조건부 위험도와 배관파손확률을 함께 고려하여 계산된 CDF/ LERF 값을 근거로 위험중요도 인자인 RRW(Risk Reduction Worth) 값으로 각 배관 세그먼트의 위험도 순위를 결정한다.

○ 전문가 회의

위험도분석 결과를 평가하고 가동중검사 대상인 고 위험도 배관을 결정하기 위한 최종검토를 수행한다. 위험도 평가결과 외에 결정론적인 고려사항, 발전소 및 산업체 경험 등을 고려하여 배관 세그먼트에 대한 최종 위험중요도를 결정한다.

○ 점검부위 선정

각 고 위험도 배관 세그먼트에서의 점검부위의 선정은 구조물, 기기 및 예상되는 손상 메카니즘에 대한 심도 있는 검토 후에 이루어진다. 점검부위 및 방법은 재료, 가동중 및 비파괴검사 전문가들로 구성된 NDE 전문가 패널에서 결정한다.

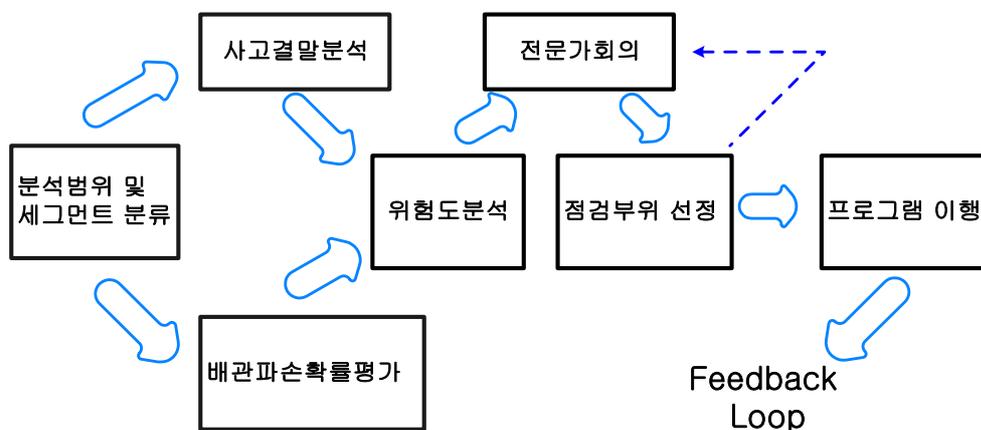


그림 1. Westinghouse RI-ISI 수행 Flow Chart

### III. 최소 검사량 결정 방법

#### 1.0 SES(Structural Element Selection) Matrix 작성

##### 1.1 목 표

배관 세그먼트의 위험중요도 순위에 따라 검사부위 선정 방법을 달리하기 위하여 모든 분석 대상 배관을 위험중요도와 배관파손확률에 따라 4개의 그룹으로 나눈다. 이를 SES Matrix의 한 구역에 할당하여, 각 구역별 선정 절차에 따라 검사부위를 선정한다. 본 과정을 통하여 Perdue 모델 평가 대상 세그먼트를 선정하게 된다.

1.2 Structural element selection(SES) matrix

SES Matrix는 위험도와 배관파손확률에 따라 4개의 구역으로 나뉘었으며, 모든 배관 세그먼트는 이중의 한 구역에 할당한다. SES Matrix 구분전에 전문가 패널에서 각 배관 세그먼트에 대한 위험도평가를 완료하여야 한다. 전문가 패널에서는 배관 세그먼트의 위험도 최종평가를 위하여 PSA 관련 정성적 또는 정량적인 정보, 배관파손확률 및 결정론적인 고찰, 설계 및 인허가 관련 정보를 충분히 가지고 있어야 한다. 상기 정보는 검사부위 선정을 돕기 위하여 작성하는 SES Matrix 작성에 유용한 정보가 된다.

**High Failure Importance(HFI)** - 현재 수행중인 강화 프로그램과 같이, active failure mechanism을 가지고 있거나, 또는 누수나 파단으로 연결될 수 있는 손상원인을 가질 가능성이 높은 세그먼트를 분류한다. engineering team은 자재, 화학적인 조건, 부하, 및 발전소 또는 산업계 경험 자료를 활용한다. HFI를 유발할 수 있는 손상원인 예는, corrosion cracking, PWSCC, 입계응력부식, microbiologically influenced corrosion, erosion-cavitation, 소구경배관의 고진동, FAC, 밸브 누수나 열성층화에 의한 열피로 등이 이에 해당된다. (단, 통상적인 가열 및 냉각에 의한 열피로는 피동적인 손상원인으로 이에 해당되지 않는다.)

High Failure Importance (HFI)	OWNER DEFINED PROGRAM (3)	(A) SUSCEPTIBLE LOCATION(S) (100%)
		(B) INSPECTION LOCATION SELECTION PROCESS (1)
Low Failure Importance (LFI)	ONLY SYSTEM PRESSURE TEST & VISUAL EXAMINATION (4)	INSPECTION LOCATION SELECTION PROCESS (2)
	Low Safety Significant (LSS)	High Safety Significant (HSS)

그림 2 Structural Element Selection Matrix

**Low Failure Importance(LFI)** - 정상운전 또는 설계하중에 의한 부하가 주 손상 메카니즘인 배관 세그먼트가 이에 해당된다. 확률론적인 배관파손확률평가코드인 SRRA 배관파손 확률값을 활용하여, 세그먼트의 파손확률이 아래의 기준을 초과하면

일반적으로 HFI로 분류한다.

$F_{\text{Large Leak}} > 10^{-3} \sim 10^{-4}$  per 40 year operating life

그림 2에 나타난 것과 같이 모든 배관 세그먼트를 4개의 구역으로 나눈다.

전문가패널에서의 위험도평가 결과 및 파손관점의 중요도 평가 결과를 활용한다. 각 구역 설정을 위한 지침은 아래와 같다.

구역 1 - 중요한 손상기구가 있는 것으로 전문가패널에서 판단하였으며, FAC와 같은 강화프로그램에 포함되어 있지 않으면 검사대상에 포함시켜야한다. 구역 1B에 해당되는 세그먼트에 대하여는 검사 최소물량을 결정하기 위하여 통계적인 모델인 Perdue 모델을 이용한다. 배관의 건전성 확인의 불확실성 및 미확인 사항에 대한 고려로 최소 한군데의 용접부에 대하여 검사를 수행하여야 한다.

구역 2 - 구역 1B와 마찬가지로 Perdue 모델을 활용하여 최소 검사량을 결정한다. 이 구역은 고 위험도배관중에서 상대적으로 배관 파손확률이 낮은 세그먼트가 이 구역에 해당된다. 대부분 세그먼트의 경우 열피로가 주 손상원인이며, 특별한 경우를 제외하면, 응력이 높은 한 군데의 검사로 신뢰도 확보가 충분한 것으로 판단된다.

구역 3 - 본 구역에 해당되는 세그먼트는 owner defined program에 의하여 검사 및 시험을 수행할 수 있다. 본 구역에 할당된 세그먼트는 발전소 안전성 관점에서는 중요하지 않을 수 있지만, 불시정지, 보수비용 등, 발전소 운영에 미치는 영향 측면에서 중요한 세그먼트이다.

구역 4 - 배관 파손에 따른 위험중요도와 배관파손확률이 낮은 나머지 세그먼트를 이 구역에 할당하며, 압력시험과 육안검사를 수행하는 것으로 검사를 대체한다.

## 2.0 Perdue Model

### 2.1 목 표

위험도 분석은 배관 세그먼트 기준으로 수행되었으나, 한 세그먼트에는 여러 개의 용접부를 포함하고 있는 것이 일반적이다. 따라서 몇 개의 용접부에 대하여 검사를 수행할 것인지를 결정하여야 하며, WOG 방법론에서는 통계적 모델인 Perdue를 활용하여 95% 신뢰도 확보를 위해 필요한 검사량을 결정하고 있다.

### 2.2 Perdue 모델 소개

Perdue 모델은 대상 배관에 대한 검사의 신뢰도를 일정한 수준 유지하는데 필요한 최소 검사량을 결정하는데 활용하는 통계적인 모델이다. 본 모델은 균열이 주 손상 메카니즘인 세그먼트를 대상으로 계산을 수행하여야 하며, 아래와 같은 세그먼트에는 적용하지 못하므로, engineering judgement에 따라야 한다.

- o 고진동 피로에서 오는 accelerated cracking, stress corrosion cracking, 또는 aggressive한 loading conditions 또는 환경
- o FAC, 침식 및 부식과 같은 감육과 관련된 손상원인
- o 체적검사가 불가능한 소켓용접부
- o coating 또는 weld overlay에 의하여 처음의 배관 상태가 변형되는 시중조치 또는 보수가 이루어진 배관

본 통계적인 모델은 “consumer risk” 개념을 도입하였다. Perdue 모델은 통계적으로 샘플링 플랜에 의하여 얻을 수 있는 안전관련 신뢰도의 평가를 위하여 활용한다. 입력자료는 검토과정 또는 SRRA 코드의 출력데이터를 이용한다. 모델의 출력데이터로부터 제안된 샘플링 플랜으로 검사 수행 시 규정된 신뢰도 목표를 만족하지 못할 가능성에 대한 정보를 얻을 수 있다. 베이지안 이론의 적용과 함께 이항분포 및 초기하분포가 perdue 모델에 사용되고 있다. ASME Section XI의 결함 발견 시 결함크기를 늘려가는 단일 샘플 및 이중샘플 구조를 역시 포함하고 있다.

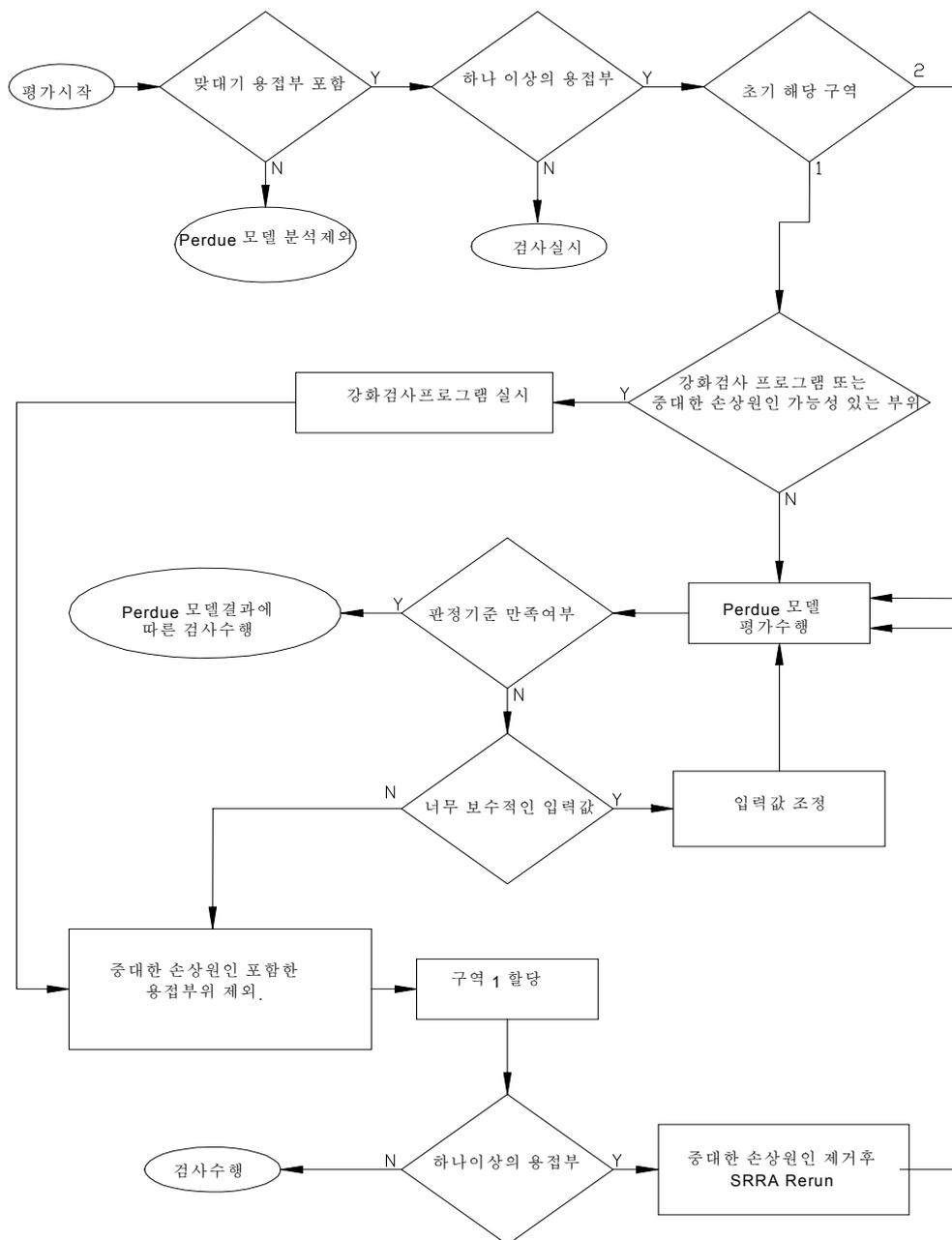


그림 3 Perdue 모델을 이용한 신뢰도 평가 절차도

### 2.3 Perdue 모델 입력작업표(Perdue Model Input Worksheet)

Perdue 모델 입력작업표는 웨스팅하우스에서 작성한 Excel 작업표로 Perdue 모델의

중요한 입력자료인 용접부위별 누설확률과 10% 관통 결함의 존재 확률을 계산하는데 사용한다. 배관파손확률평가 코드인 SRRA 출력데이터를 이용하여 Perdue 모델 입력작업표를 작성한다. Perdue 입력작업표에서는 배관파손확률값 중에서 보수적으로 소량누설확률을 이용한다. base case와 snubber locking case 모두에 대한 소량누설확률값이 있을 경우에는 보수적인 값을 선택한다. Perdue 모델 입력작업표 입력자료는 아래와 같다.

- PIPE/ODIA Median Value
- WALL/ODIA Median Value
- INT%DEPTHMedian Value
- INT%DEPTH Deviation Factor
- FLAWS/IN Median Value
- Small Leak Probability at Current Year
- Small Leak Probability at End of Life

#### 2.4 Perdue 모델 입력(Perdue Model Input)

Perdue 모델 입력작업표의 출력데이터(Probability of flaw(@ specified yr)/weld, Conditional probability of leak/yr/weld)를 입력자료로 활용한다. 만약에 세그먼트가 구경이 다른 배관으로 구성되어 있다면, 현재의 발전소 상태에서 보수적으로 가장 큰 누설확률값을 사용하고, 가장 작은 허용 누설율을 판정기준으로 사용한다. 이와 같은 보수적인 값을 사용하고 요건을 만족하면, 구경에 관계없이 만족하는 것으로 판정한다. Perdue 모델 입력자료는 아래와 같다.

○ 용접부위 수 - 샘플 플랜을 돌리기 위해서는 용접부위 수가 둘 이상이어야 하며, 최대치에 대한 제한은 없다. 단, 용접부위 수가 너무 많으면, 부정확한 결과값을 얻게 된다. 이항분포의 합계값이 0.95 이상인지를 용접부위의 과다여부를 확인한다.

세그먼트의 용접부위 수를 파악할 자료가 없으면, 예상한 숫자를 기록하고 이를 가정사항에 포함시킨다.

○ Probability of flaw(@ specified yr)/weld - 현재 발전소 운전년수에서 허용기준을 초과하는 결함이 존재할 확률이다. 불만족한 결함은  $a/t > 0.10$  인 결함이며, SRRA에서 자료를 취한다. 역시 최대값에 대한 제한은 없지만, 결함이 존재할 확률이 높으면, 이항분포의 합계값이 0.95 이하가 되며, 이 경우 부정확한 값을 얻게 된다.

○ 결함검출률(Probability of Detection (POD))

결함이 존재한다고 가정할 때, 선정된 비파괴검사방법으로 결함을 검출할 확률로 0 보다는 크고 1.0 이하이어야 한다. 보수적으로 0.2를 채택하며, POD 값이 적을수록 보수적인 신뢰도 분석값을 얻게 된다.

○ Conditional probability of leak/yr/weld - 이는 단순히 조건부 누설율이라고도 부르며, 10% 결함이 through-wall crack으로 성장할 확률이다. Perdue 모델에서는 without ISI 배관파손 확률값을 사용한다. 발전소 수명기간과 발전소 현재 배관누설확률을 함께 고려하여 남은 기간 동안의 평균 배관 누설확률을 계산한다. 이 조건부 누설확률은 perdue 모델 입력작업표에서 계산된다.

○ Single sample size

샘플크기는 용접부 숫자보다 작은 정수이어야 한다. 일반적으로 샘플크기 하나가 결정한다.

○ Target leak rate/yr/weld - 각 용접부의 년 단위 최대 허용누설율을 가리킨다. 배관

재질 및 크기별로 원자력발전소 배관에 권고하는 누설율이 아래의 표에 명시되어 있다.

Material	Nominal Pipe Diameter (inches)		
	≤ 1"	1" < x < 4"	≥ 4"
Stainless Steel	1.0E-05	1.0E-05	1.0E-06
Ferritic Steel	1.0E-05	1.0E-06	5.0E-06

테이블 1 배관 구경 및 재질에 따른 허용누설율

### 2.5 판정기준

다수의 샘플링 플랜에 대하여 Perdue 평가 결과가 마련된다. Pre-ISI(No ISI) 및 double 샘플 플랜 (샘플크기=1) 이 첫 번째 점검사항이다. Perdue 모델은 아래의 세 가지 사항을 충족할 경우 만족한 것으로 본다.

- o 해당 세그먼트 목표 누설률에 대한 신뢰도가 95% 이상이어야 함
- o 평균 누설률이 목표누설률을 초과하지 않을 것
- o 이항분포 확률값의 합이 0.95 이상 일 것

### 3.0 울진 4호기 적용결과

#### 3.1 SES Matrix

울진 4호기 RI-ISI 프로그램은 안전등급 class 1,2 배관을 대상으로 하고 있다. 격납건물 격리 밸브 부위의 class 2 배관을 가진 계통을 포함하여 전체 30개 계통을 1,951개 세그먼트로 구분하였다. 전체 1918개 배관 세그먼트에 대하여 분석을 수행하였으며, 33개 세그먼트는 분석 중에 삭제되었다. 구역별로 할당된 배관 세그먼트는 그림 4와 같다.

High Failure Importance (HFI)	Region 3 [71segments]	Region 1 [49 segments]
Low Failure Importance (LFI)	Region 4 [1643 segments]	Region 2 [155 segments]
	Low Safety Significant (LSS)	High Safety Significant (HSS)

그림 4 배관 세그먼트 각 구역별 할당 결과

3.2 최소검사량 결정

121 개 배관 세그먼트에 Perdue 모델을 사용하여 최소검사량을 결정하였다. 83개 배관 세그먼트는 소켓용접부, 단일용접부, 구역 1A에 할당되어 Perdue 모델 평가를 수행하지 않았다. 테이블 2에는 Perdue run이 필요하지 않은 세그먼트를 분류하여 놓았다. 울진 4호기의 경우 Perdue 모델을 이용하여 121 개 배관 세그먼트에 대한 신뢰도평가를 수행한 결과 최소 검사 수량인 한 군데의 검사로도 요구되는 95%의 신뢰도를 확보할 수 있는 것으로 평가되었다. 테이블 3은 울진 4호기 계통별 최소검사량 선정결과 초안이다.

Region	Perdue Model	Reason for No Perdue Run	Number of Segments
Region 1	Yes		33
	No	Region 1A	6
		Single	8
		Socket	2
		Connection	0
Subtotal			49
Region 2	Yes		88
	No	Region 1A	0
		Single	24
		Socket	28
		Connection welds	15
Subtotal			155
Total			204

테이블 2 Perdue model Run을 위한 용접부 형태 분류

System	Inspection Point Numbers	Class 1	Class 2	VT-2 points at Region 1&2	Added Numbers by the HELB
RC	18	18	0	38	0
HS	57	35	22	26	0
MS	95	0	95	6	68
LS	22	0	22	4	0
AF	2	0	2	0	0
CS	16	0	16	0	0
CV	3	1	2	4	0
SC	5	2	3	0	0
SD	6	4	2	1	0
PX	0	0	0	1	0
BD	0	0	0	0	0

FW	0	0	0	0	0
Total	224	60	164	80	68

테이블 3 울진 4호기 계통별 최소 검사량 선정결과(초안)

#### IV. 결 론

울진4호기 RI-ISI 시범연구에 적용한 WOG RI-ISI 프로그램에서 배관 세그먼트별 최소 검사량을 결정하는 과정과 이에 사용하는 Perdue 모델에 대하여 기술하였다. 각 배관 세그먼트별 최소 검사량 결정에 Pedue 모델을 사용함으로써 목표 검사 신뢰도 수준(95%)을 만족함을 확인할 수 있게 되었다. 울진 4호기 RI-ISI 프로그램 개발에 적용한 결과, 각 검사 대상 배관 세그먼트에 대하여 하나의 검사부위 선정으로 충분한 검사 신뢰도를 확보할 수 있는 것으로 확인되었다. RI-ISI 방법론의 타 원전 확대 적용 시에도 본 모델을 활용하여 검사 신뢰도를 확인할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 참고문헌

- [1] WCAP-14572, Revision 1-NP-A "Westinghouse Owners Group Application of Risk-Informed Methods to Piping Inservice Inspection Topical Report". Feb. 1999
- [2] Westinghouse procedure, "Perdue model Guidance document"
- [3] Westinghouse working paper, "A spreadsheet Model for the Evaluation of Statistical Confidence in Nuclear Inservice Inspection Plans"