



Axial Power Distribution Synthesis for In-CORE Protection System (ICOPS) Using Artificial Neural Network with a Single Hidden Layer

[심경우, kwshim@knfc.co.kr](mailto:kwshim@knfc.co.kr)

[박영호, yhpark@knfc.co.kr](mailto:yhpark@knfc.co.kr)

2018. 10. 25.

Contents



I. ICOPS 개요

II. CPCS/RCOPS 축방향 출력분포 합성 방법 

III. 인공신경망 적용 축방향 출력분포 합성 방법

IV. OPR1000 원전 적용 결과

V. 요약 및 결론

I. ICOPS 개요

○ 노심보호계통 축방향 출력분포 합성 방법론 개발 배경

독자 기술 확보 필요

- SAM을 이용한 축방향 출력분포 합성 방법은 WEC의 원천 기술
- 독자 기술 확보를 통한 WEC의 지적 재산권 회피

축방향 출력분포 합성 정확도 향상

- 주기 말 RMS 오차 증가 현상 개선

I. ICOPS 개요

고유 노심보호/감시계통 필요성

노심보호/감시계통 관련 고유 기술 확보 현황

	H/W	On-Line S/W 및 Off-Line 알고리즘	설계코드/방법론
노심보호계통	RCOPS 국내고유화 100%	- 열수력, 축방향 출력분포: WEC 원천기술 - 기타: 공지 기술	- (100%) WEC 원천 기술
노심감시계통	국내고유화 100%		

주) 해외 원전 수출을 위해서는 WEC의 동의를 있어야 가능함

I. ICOPS 개요

○ ICOPS (In-Core Protection System)

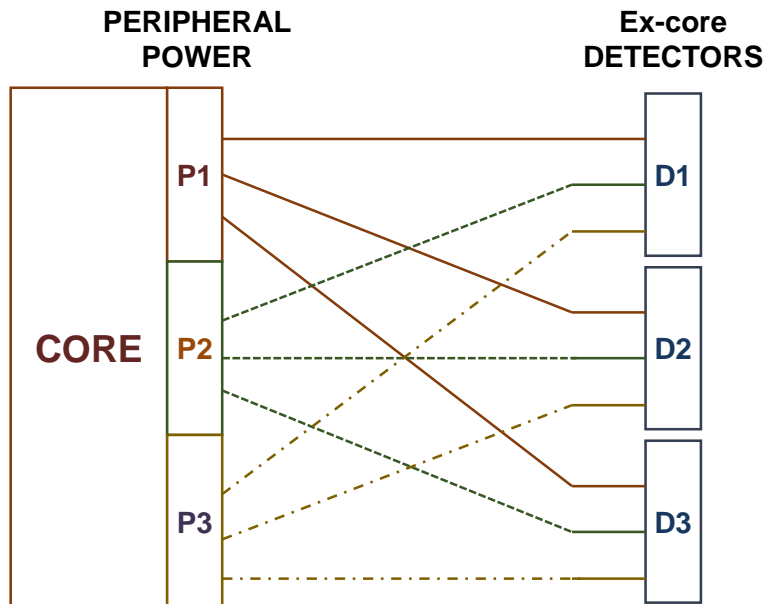
구분	APR1400 노심보호계통	고유 노심보호계통	Comments
계통 명칭	CPCS	ICOPS	In-COre Protection System
프로그램 명칭	FLOW UPDATE	HEATUP	HEAT flux UPdate
	POWER	POWER	Power Distribution
	STATIC	ORCA	Optimized Reactor Core Analysis
	TRIPSEQ	TRIGGER	TRIP siGnal GEneration
	CEAC	CPEN	CEA PENAlty calculation

- 공지기술 → 변수/알고리즘 명 변경, 실행순서 효율적으로 재구성, 기능개선사항 추가
- 고유기술 → 고유 열수력 및 출력분포 합성방법 적용 → ICOPS 기능요건서 개발

II. CPCS/RCOPS 축방향 출력분포 합성 방법

○ CPCS/RCOPS SAM (Shape Annealing Matrix, 형상처리행렬)

- 3-Level 노외계측기 신호로부터 3-Level 노심외곽출력을 계산
- CPCS의 SAM은 OPR1000/APR1400 원전에서 매주기 초 기동시험 시 결정하는 상수
- 출력상승시험 (또는 Xe 진동 방법) 중에 취득한 발전소 자료를 이용하여 **최소자승법** 또는 **모의담금질** 방법으로 생산함



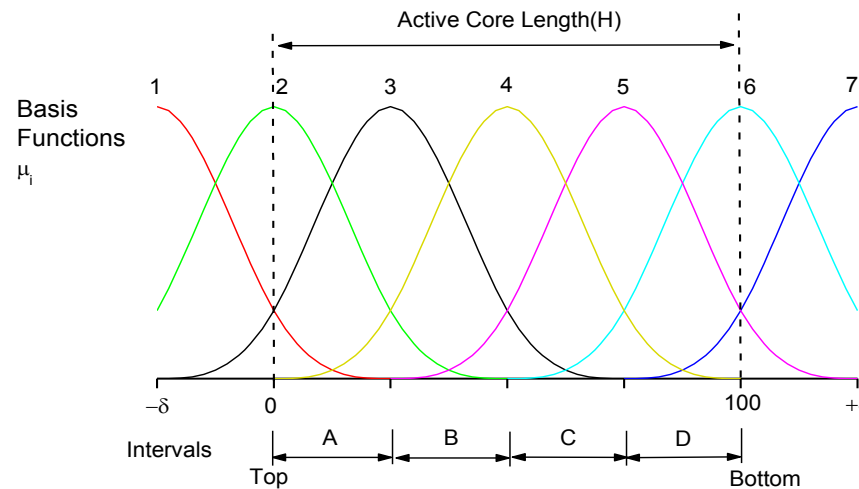
$$\begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix}$$

II. CPCS/RCOPS 축방향 출력분포 합성 방법

○ CPCS/RCOPS Cubic Spline 합성법

- 3-Level 노심외곽출력으로부터 20개 노드의 축방향 출력분포를 계산
- Cubic Spline Functions의 합으로 가정

$$\varphi(z) = \sum_{i=1}^{N+3} a_i \mu_i(z), \quad N = \text{Number of spline zones in active core}$$

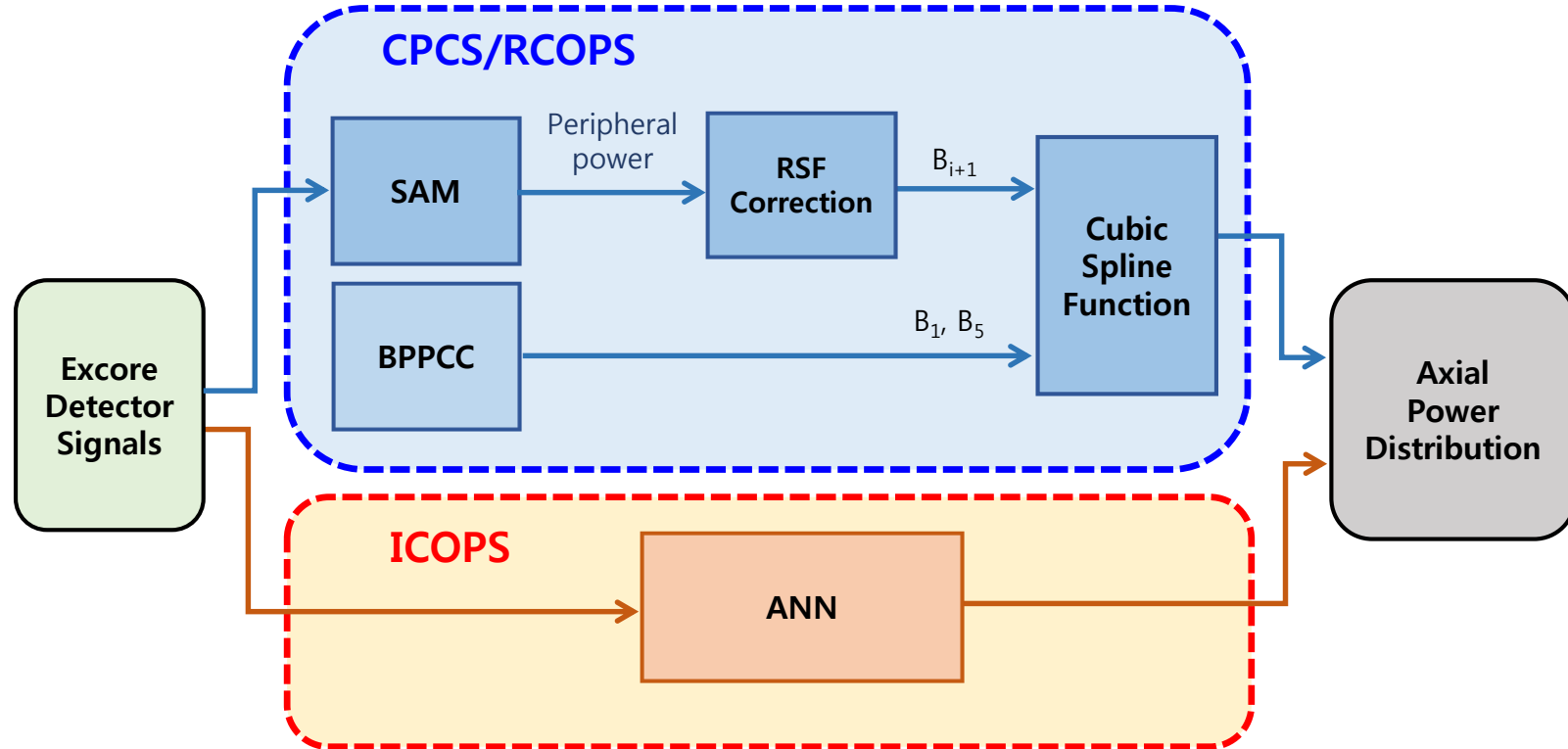


For interval A : $\varphi(z) = \sum a_i \mu_i(z), i=1,4$

**3-Level Detector
System**

II. CPCS/RCOPS 축방향 출력분포 합성 방법

○ CPCS/RCOPS Vs. ICOPS 축방향 출력분포 계산 흐름도 비교

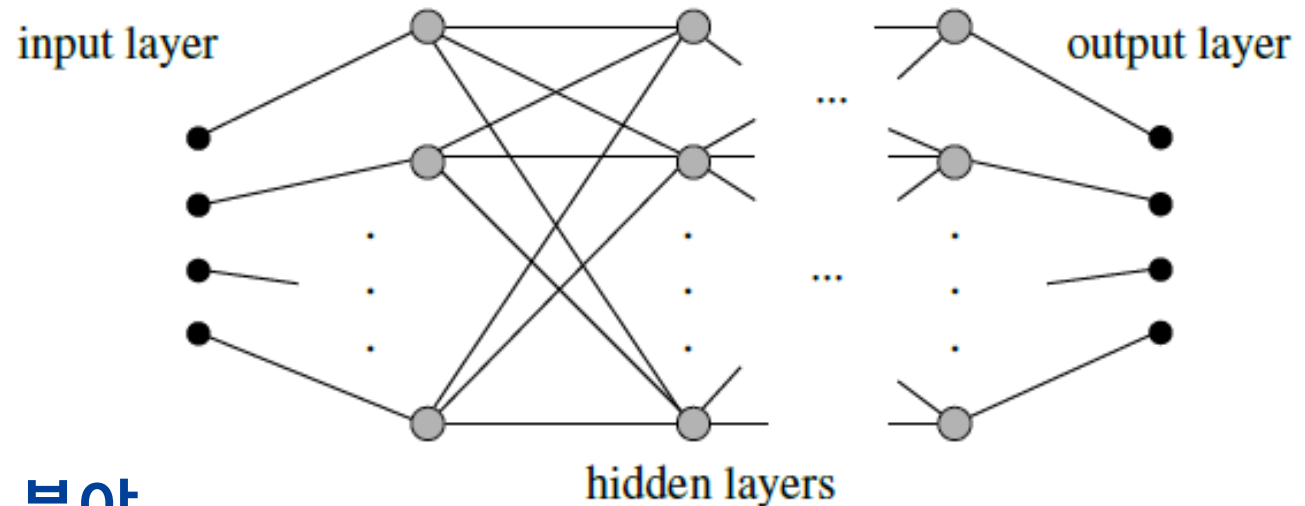


- *SAM* - Shape Annealing Matrix
- *BPPCC* - Boundary Point Power Correlation Coefficient
- *RSF* - Rod Shadowing Factor
- *ANN* - Artificial Neural Network

- B_{i+1} - the i^{th} elements of the power vector, $i=1,2,3$
- B_1, B_5 - the upper and lower boundary point power

III. 인공지능망 적용 축방향 출력분포 합성 방법

○ 다층(Multi Layer) 인공지능망



○ 인공지능망 적용 분야

- 회귀 분석, **함수 근사**
- 패턴 인식 및 순서 인식 그리고 순차 결정 같은 분류 알고리즘
- 인공 기관의 움직임 조정 같은 로봇 제어
- 그 외 암 진단과 같은 의학, 재무, 회계, 경제 전망과 같은 경영학 등 다양한 분야에 적용됨.

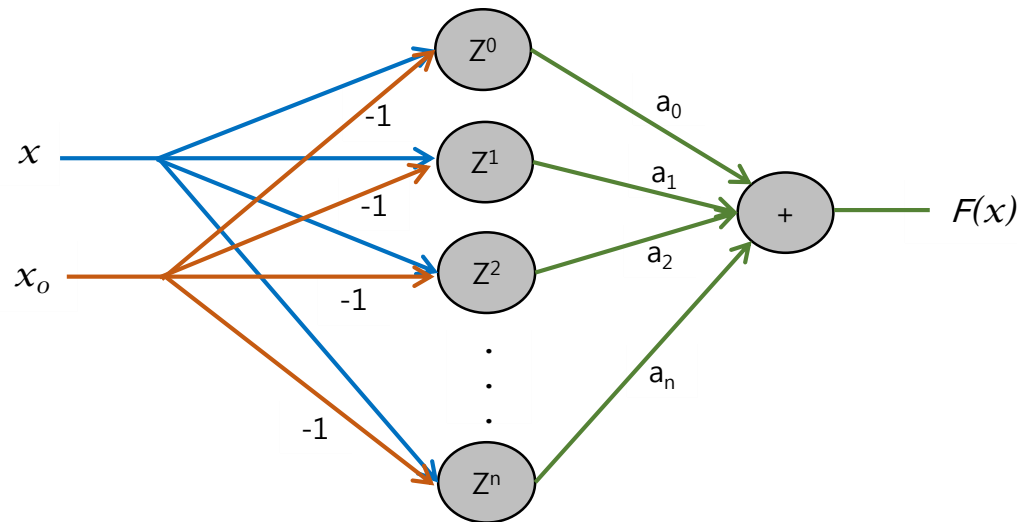
III. 인공지능경망 적용 축방향 출력분포 합성 방법

○ 함수 근사 (Approximation of Functions)

• Universal approximation theorem:

“A feed-forward network with a single hidden layer containing a finite number of neurons can approximate continuous functions.”

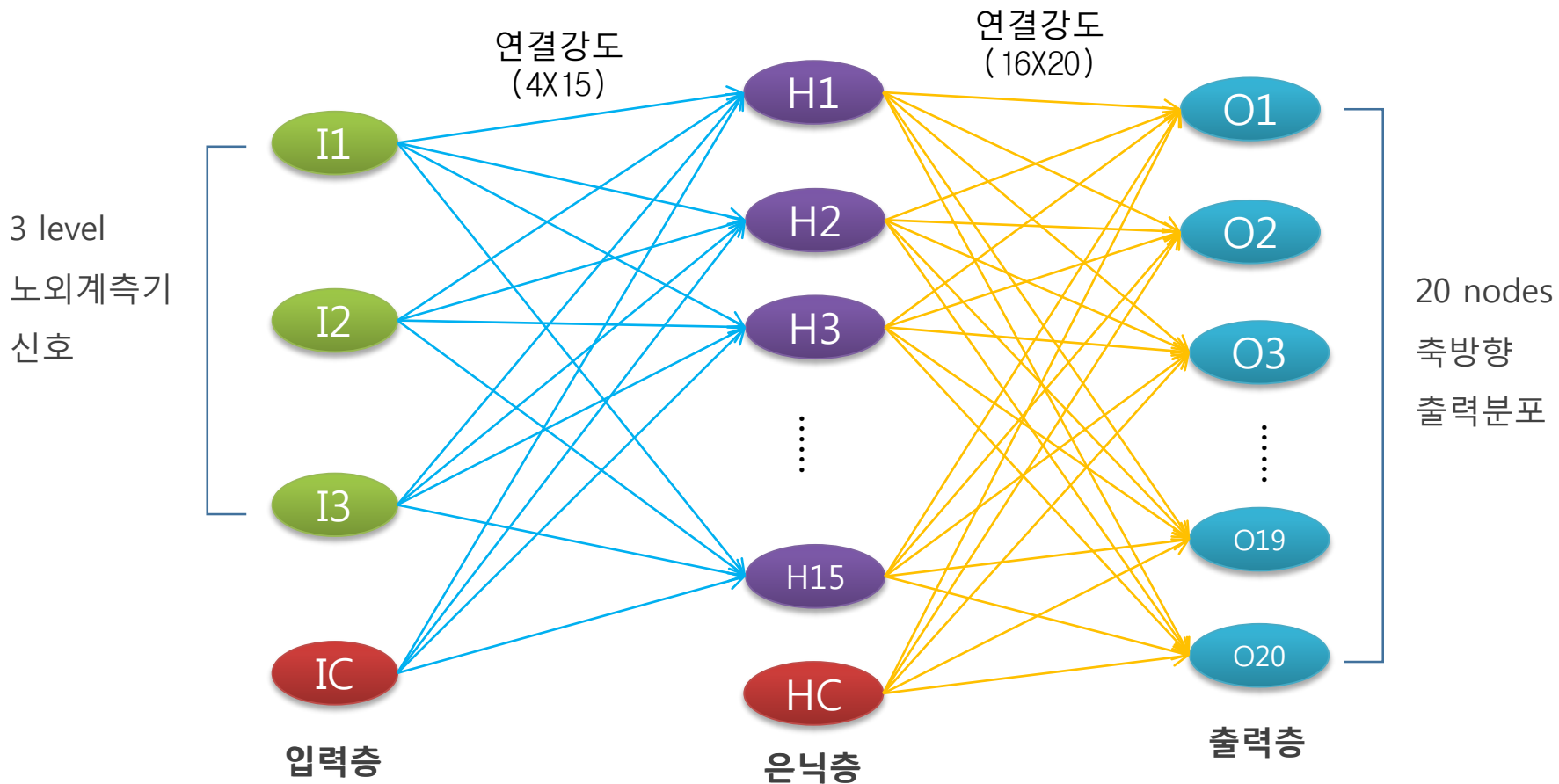
A Taylor Network



$$F(x) = a_0 + a_1(x-x_0) + a_2(x-x_0)^2 + \dots + a_n(x-x_0)^n + \dots$$

III. 인공지능망 적용 축방향 출력분포 합성 방법

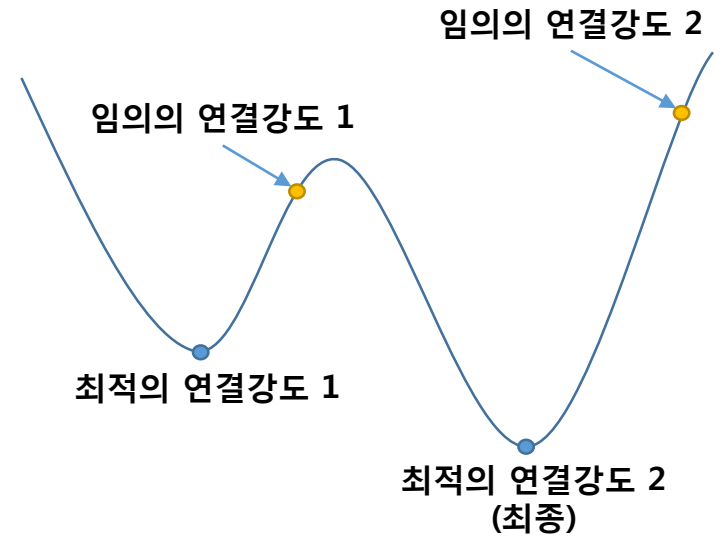
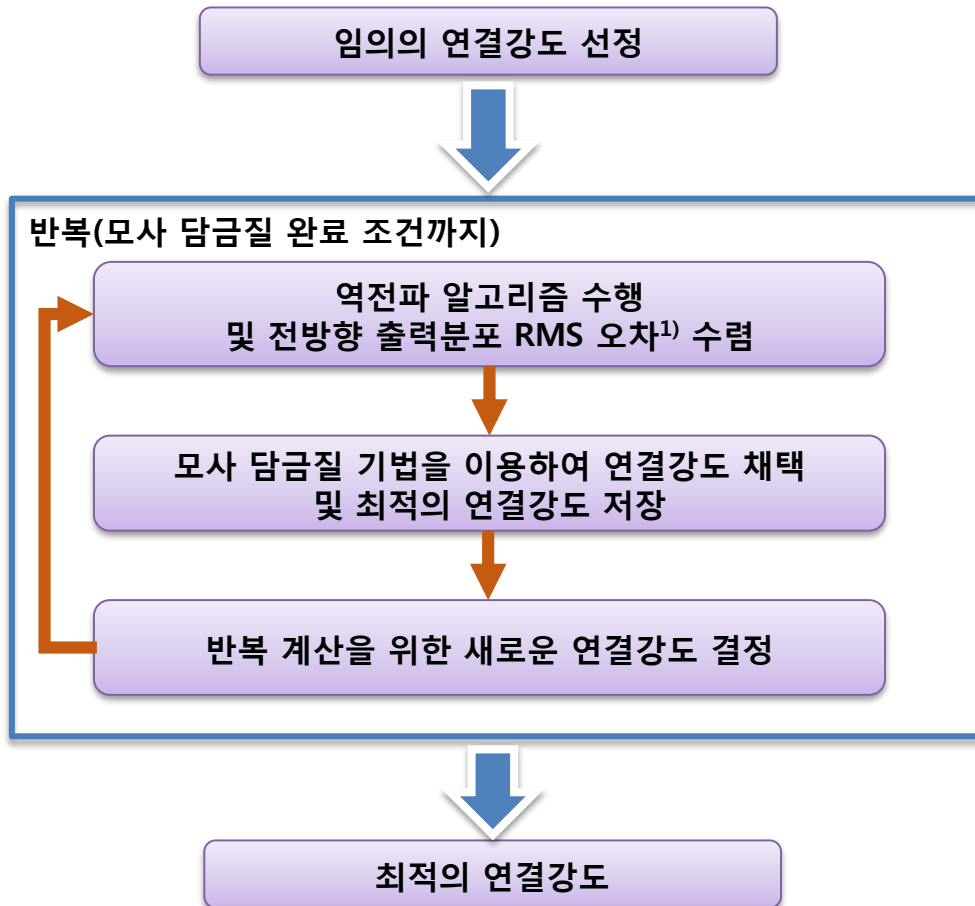
ICOPS 인공지능망 구성



III. 인공지능망 적용 축방향 출력분포 합성 방법

○ 인공지능망 학습 방법:

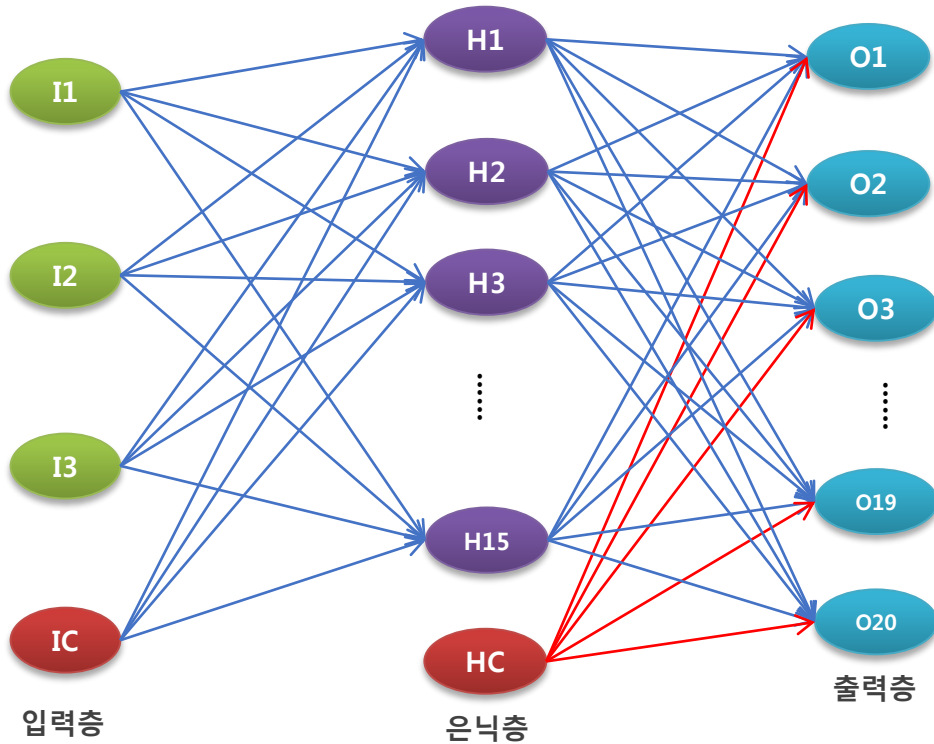
역전파(Back Propagation)+ 모사담금질 기법(Simulated Annealing)



주 1) RMS 오차: Root-Mean-Square Error

$$RMSE(FZ_i^{CPC}) = \sqrt{E \left((FZ_i^{CPC} - FZ_i^{REF})^2 \right)}$$

III. 인공지능망 적용 축방향 출력분포 합성 방법



→ 설계자료로 학습

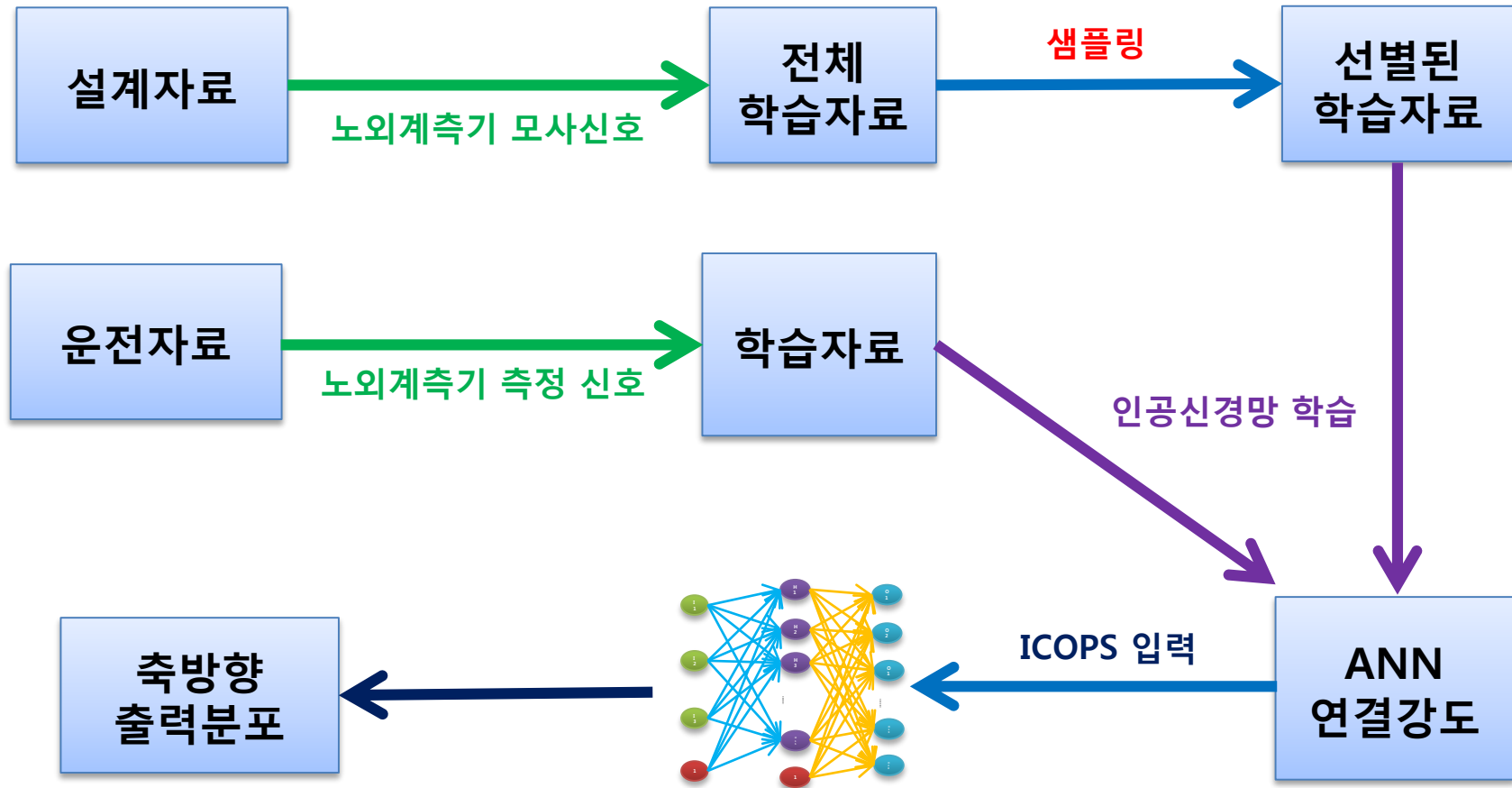
→ 운전자료로 학습

연결강도 계산 방법

- **설계자료**로 학습하여 결정
(연료 타입, 장전 모형 반영)
 - 입력층 → 은닉층: $4 \times 15 = 60$ 개
 - 은닉층 → 출력층: $15 \times 20 = 300$ 개
- **운전자료**로 학습하여 결정
(운전 특성 반영)
 - 은닉층 → 출력층: $1 \times 20 = 20$ 개

IV. OPR1000 원전 적용 결과

연결강도 계산 방법



IV. OPR1000 원전 적용 결과

○ 설계자료 학습 Case 선정

● 데이터 선정

- CPCS OUA(Overall Uncertainty Analysis)에 사용되는 노심 모사 자료 중 선정
- OUA: 4개 연소도 구간, 각 연소도별 약 1200 Cases를 분석

● 노심 모사 주요 인자

- Core Power (20, 40, 60, 80, 90, 100%)
- CEA Configuration (Group 5, 4, and Part Strength CEA Insertion)
- Xe Condition (Equilibrium, Oscillation)

IV. OPR1000 원전 적용 결과

○ 운전자료 학습 Case 선정

● 교체노심 데이터 선정

- SAM 측정을 위해 취득된 30~80% 출력의 FPA(Fast Power Ascension) 자료 활용
- 약 40~80개 자료

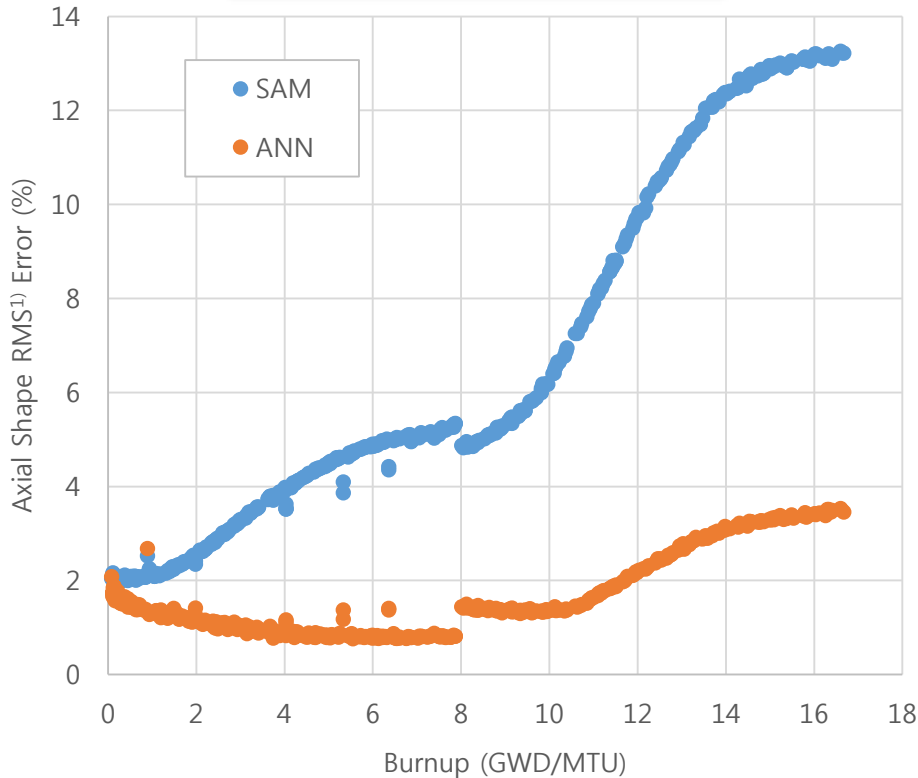
● 초기노심 데이터 선정

- SAM 측정을 위해 취득된 50% 출력에서의 제논진동 자료 활용
- First half cycle 자료 약 60개

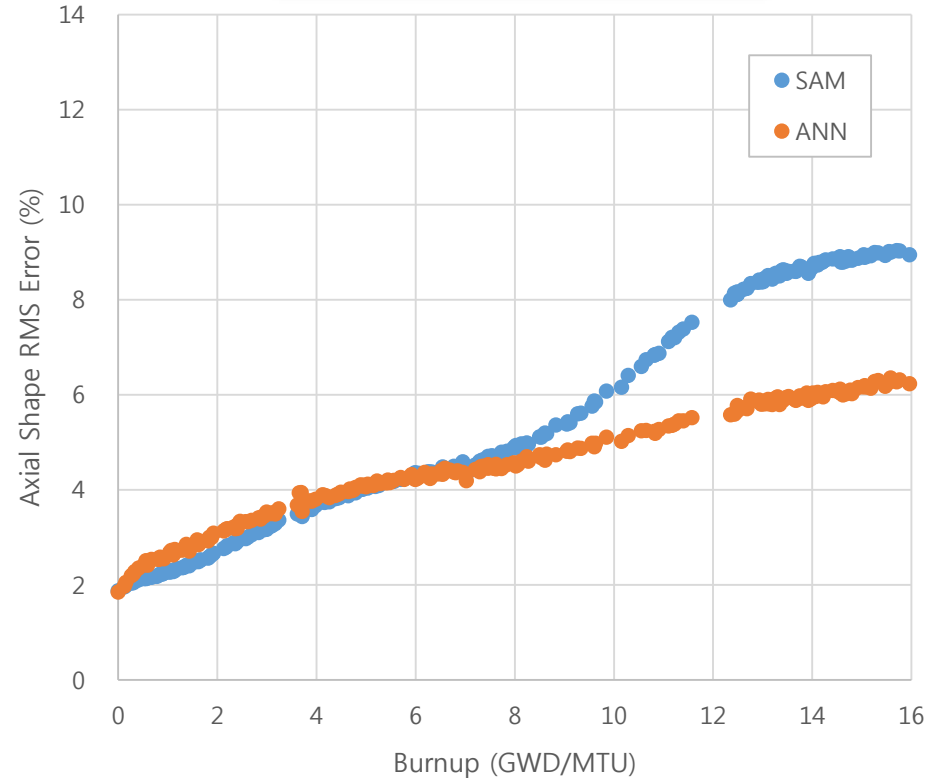
IV. OPR1000 원전 적용 결과

한 주기 동안의 100% 출력 운전 이력에 적용한 결과 (교체노심)

한울4호기 제8주기



한울4호기 제10주기



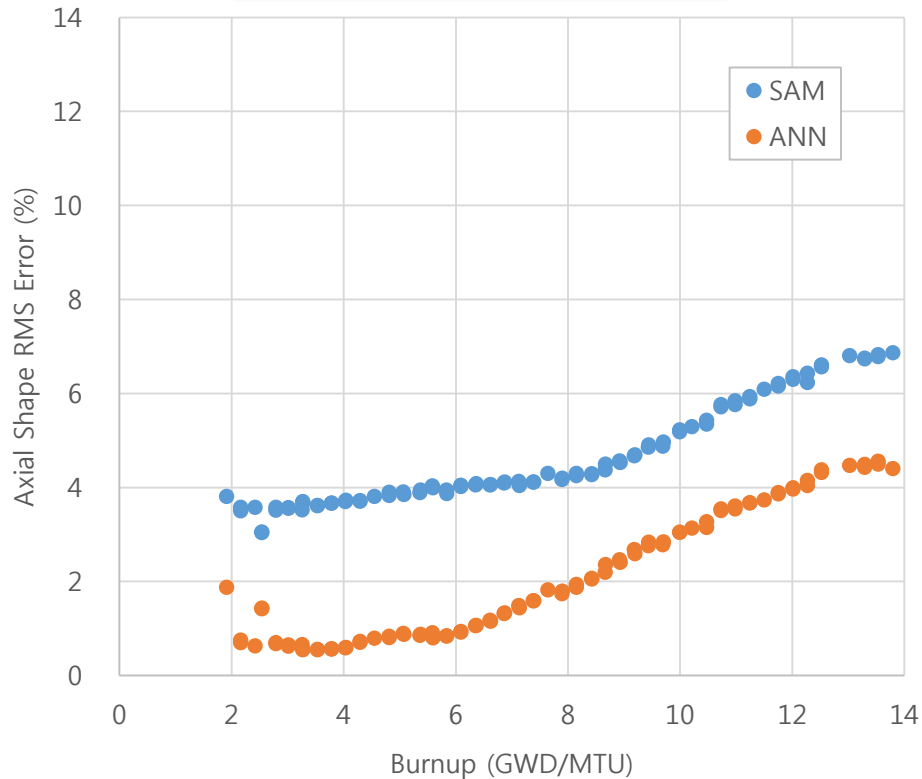
주 1) RMS 오차: Root-Mean-Square Error

$$RMSE(FZ_i^{CPC}) = \sqrt{E((FZ_i^{CPC} - FZ_i^{REF})^2)}$$

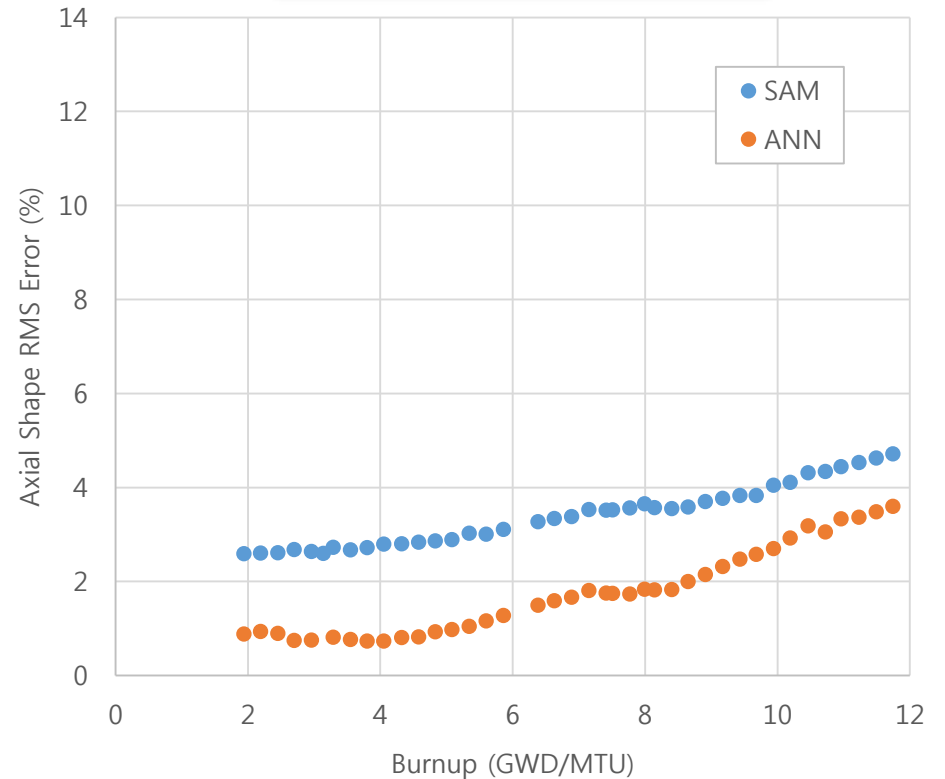
IV. OPR1000 원전 적용 결과

한 주기 동안의 100% 출력 운전 이력에 적용한 결과 (초기노심)

신고리1호기 제1주기



신월성1호기 제1주기



V. 요약 및 결론

○ 노심보호계통 축방향 출력분포 합성 방법 개발

- 인공지능망 (ANN) 방법론 적용
- ANN의 연결강도 결정은 역전파 알고리즘과 모사 담금질 기법 사용
- 연결강도: 설계자료로 학습 (360개) 및 운전자료로 학습 (20개)

○ OPR1000 원전의 초기 및 교체노심 적용 평가

- 초기노심과 교체노심에서 모두 축방향 출력분포 RMS 오차 감소

→ 인공지능망 기법을 활용한 노심보호계통 축방향 출력분포 합성 방법은 축방향 출력분포 합성 정확도를 향상시킨 독자기술임

감사합니다

