

원전 이종금속 맞대기용접부 PWSCC 균열건전성평가[§]

이성호^{†*} · 이경수^{*} · 오창영^{**}

* 한수원중앙연구원, ** 고려대학교 기계공학부

Evaluation of PWSCC at Dissimilar Metal Butt Welds in NPP

Sung Ho Lee^{*†}, Kyoung Soo Lee^{*} and Chang Young Oh^{**}

* KHNP Central Research Institute,

** Dept. of Mechanical Engineering, Korea Univ.

(Received April 10, 2012 ; Revised May 16, 2012 ; Accepted May 18, 2012)

Key Words: Primary Water Stress Corrosion Cracking(일차수응력부식균열), Dissimilar Metal Weld(이종금속용접부), Crack Growth Rate(균열성장속도)

초록: 가압경수로형 원전의 Alloy 600 원자로압력용기헤드 관통노즐 및 Alloy 82/182 이종금속 맞대기 용접부에서 일차수응력부식균열(PWSCC)이 보고된 이후 전 세계적으로 PWSCC 에 의한 용접부 파단을 예방하기 위해 강화검사를 적용하고 있다. 본 이종금속용접부에 대한 가동중검사에서 균열이 발견된 경우 건전성평가 결과가 도출되기까지 발전소가 정지 상태에 있게 됨에 따라 원전 이용율 저하가 발생할 수 있는데, 이를 예방하기 위해서는 균열건전성평가 관련 기술의 정립뿐만 아니라 신속하게 평가 결과를 도출할 수 있는 시스템의 구축이 필요하다. 본 연구에서는 이종금속 맞대기 용접부를 대상으로 진행하고 있는 PWSCC 균열건전성평가 기준 정립 및 전산 시스템 개발 결과를 제시하였다. 본 연구를 통해 이종금속 맞대기 용접부 PWSCC 균열건전성평가 기술이 정립되고 전산 시스템으로 구현되어 원자로압력용기 주변 이종금속 맞대기 용접부에서의 PWSCC 균열에 대한 기술적 건전성평가 수단을 확보하였다.

Abstract: Primary water stress corrosion cracking (PWSCC) instances have been reported in the Alloy 600 reactor pressure vessel head penetration nozzle and the Alloy 82/182 dissimilar metal butt weld nozzle in several PWRs. Therefore, in-service inspection programs have been adopted worldwide to prevent failure at the weld region. If a PWSCC is observed at the dissimilar metal weld region during inspection, its structural integrity should be evaluated; however, this requires considerable time and effort, and this might lead to a decrease in the plant utilization coefficient. To prevent this, KHNP-CRI have established integrity assessment criteria and developed a computer program for the fast evaluation and judgment of PWSCC. In this paper, the results and current status of the same are presented. Through this study, criteria for the structural integrity evaluation of PWSCC have been established, and a computer program has been developed to realize technical means for the evaluation of PWSCC structural integrity.

1. 서 론

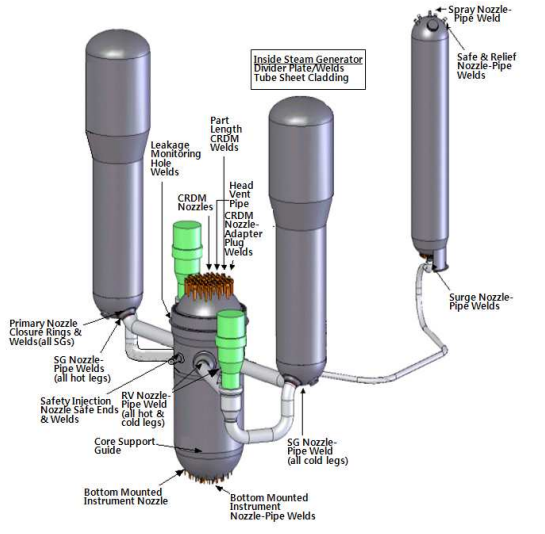
가압경수로형 원전의 Alloy 600 원자로압력용기헤드 관통노즐 및 Alloy 82/182 이종금속 맞대기 용접부에서 일차수응력부식균열(PWSCC)이 보고된⁽¹⁾ 이후 전 세계적으로 PWSCC 에 의한 용접부

파단을 예방하기 위해 강화검사를 적용하고 있다. 미국의 경우 원자로압력용기 헤드 관통노즐에 대해 2003 년부터 NRC Order EA-03-009 에 따라 주기적 검사를 수행하여 왔고 2009 년부터는 NRC 10CFR50.55a 및 ASME B&PV Code, Code Case N-729-1 에 따라 기량검증을 수행해 오고 있다. 국내에서도 PWSCC 를 관리하기 위해 2008 년부터 강화검사를 수행하고 있는데(기량검증은 2011 년부터 시행), 강화검사를 통해 균열이 탐지되었을 경우 ASME B&PV Code, Sec. XI 에 따라 균열건전성평가를 수행하여 보수 또는 계속 운전 허용 여부

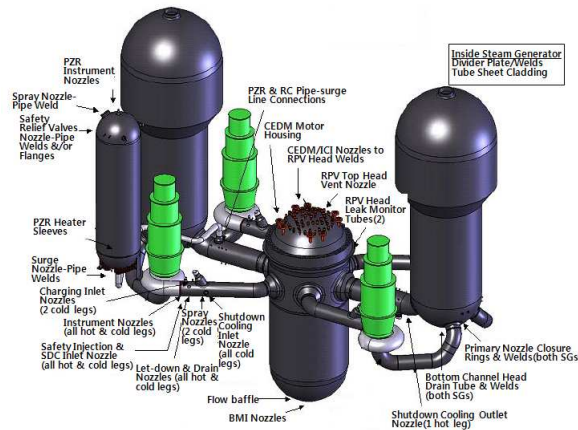
§ 이 논문은 2012 년도 대한기계학회 신뢰성부문 춘계학술대회 (2012. 4. 5.-6., 영남대학교) 발표논문임.

† Corresponding Author, sungho@khnp.co.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers



(a) Westinghouse Type



(b) Combustion Engineering Type

Fig. 1 Locations of dissimilar metal welds in NPP

를 결정하고 있다.

Fig. 1 에 국내 가동 중인 웨스팅하우스형 원전 (Westinghouse Type) 및 한국표준형 원전(Combustion Engineering Type)의 원자로압력용기 헤드 관통노즐, 원자로냉각재계통 배관 등 주요 이종금속 용접부의 위치를 제시하였다.

상기 이종금속 용접부에 대한 가동중검사에서 균열이 발견된 경우 건전성평가 결과가 도출되기 까지 발전소가 정지 상태에 있게 됨에 따라 원전 이용률 저하가 발생되며, 이를 예방하기 위해서는 균열건전성평가 관련 기술의 정립뿐만 아니라 신속하게 평가 결과를 도출할 수 있는 시스템의 구축이 필요하다.

본 연구에서는 Table 1 에 제시한 이종금속 맞대기 용접부를 대상으로 PWSCC 균열건전성평가 기준 정립하고 전산 시스템으로 구현한 결과를 기술하였다.

Table 1 Modeling objects for PWSCC crack evaluation

발전소명	고리산	해석	고리산	해석	고리산	해석	고리산	해석	고리산	해석	고리산	해석	고리산	해석	고리산	해석	합계	해석(%)
압력용기저온관	2	1	2	1	3	1	3	3	3								16	3
압력용기고온관	2	1	2	1	3	1	3	3	3								16	3
안전주입노즐	4	1	2	1													6	2
고온관 RTD 노즐용접부										10	2	10	10	10	10	10	60	2
고온관 압력저속 노즐 용접부										9	2	9	9	9	9	9	54	2
고온관 밀링노즐 용접부										1	1	1	1	1	1	1	6	1
고온관 정지냉각노즐 용접부										2	1	2	2	2	2	2	12	1
저온관 RTD 노즐 용접부										12	2	12	12	12	12	12	72	2
저온관 안전주입노즐 용접부										4	1	4	4	4	4	4	24	1
저온관 충전입구노즐 용접부										1	1	1	1	1	1	1	6	1
저온관 부루노즐용접부										2	1	2	2	2	2	2	12	1
계	8	3	6	3	6	2	6	6	6	41	11	41	41	41	41	41	284	19

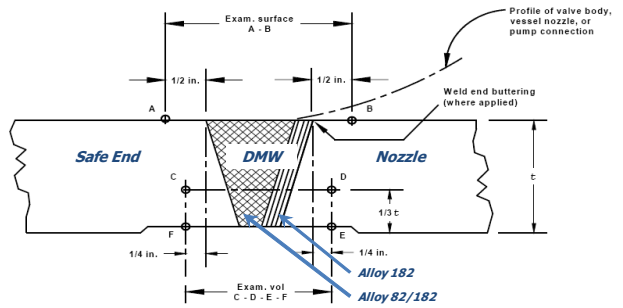


Fig. 2 Examination volume of butt DMW

2. PWSCC 균열건전성평가

2.1 이종금속 맞대기 용접부 형상 및 검사 영역
이종금속 맞대기 용접부는 Fig. 2 에서와 같이 노즐(Nozzle)과 안전단(Safe End)를 연결하는 부위로서 버터링 및 용접재로 Alloy 82, Alloy 182 가 각각 사용된다.

본 이종금속 맞대기 용접부의 PWSCC 균열 존재 여부 확인을 위하여 Fig. 2 의 A-B 영역과 C-D-E-F 영역에 대한 가동중검사를 수행하는데, A-B 영역에 대해서는 표면검사를, C-D-E-F 영역에 대해서는 체적검사를 각각 수행한다. 체적검사의 경우, 축방향으로는 외면 용접부 양단으로부터 1/4 inch 씩 각각 확장하고 두께방향으로는 내면으로부터 전체두께(t)의 1/3 에 해당되는 깊이($1/3 t$)까지 원주방향으로 전체에 해당하는 체적을 검사대상으로 한다.⁽²⁾

2.2 배관 균열 평가 절차

가동중검사에서 맞대기용접 배관에 균열이 발견되었을 경우(깊이 a , 길이 l), Fig. 3 에서와 같이, 피로(Fatigue)와 응력부식균열(SCC)을 고려한 균열 성장을 해석하고 차기 가동중검사 주기에서의 최종 균열 크기(a_f, l_f)를 도출하여 정상/이상/비상/고장 운전조건(Level A/B/C/D)별 허용 균열 크기(a_{allow}, l_{allow})와 비교한다. 차기 가동중검사 주기에서의 최종 균열 크기(a_f, l_f)가 균열 허용 기준

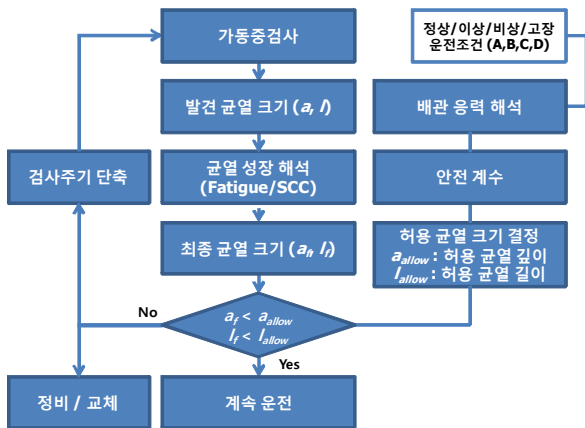


Fig. 3 Scheme of flaw evaluation in piping

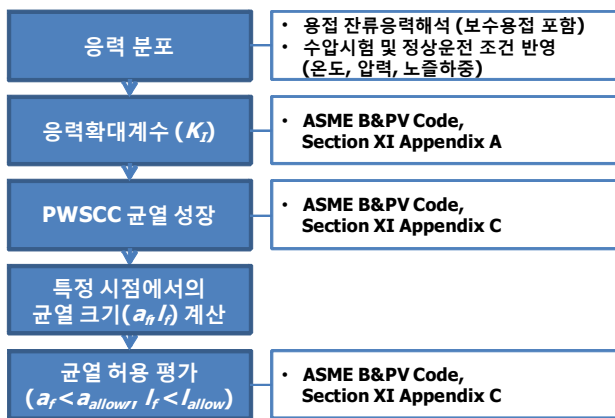


Fig. 4 Scheme of PWSCC crack evaluation

($a_f < a_{allow}, l_f < l_{allow}$)을 만족하게 되면 계획된 차기 가동중검사 주기까지 계속 운전이 허용 되나, 불 만족하게 되면 정비 또는 교체하거나 허용 기준을 만족할 수 있는 시점까지 운전 및 검사 주기를 단축해야 한다.

2.3. PWSCC 균열건전성평가 기준

본 절에서는 Fig. 3의 배관 균열 평가 절차 중에서 PWSCC 관련 내용을 Fig. 4에 제시하였다.

2.3.1. PWSCC 균열건전성평가 모델링 대상

본 연구에서는 Table 1에 제시한 국내 가압경수로 원전의 284개 주요 이중금속 맞대기 용접부를 대표하는 19개 용접부를 선별하여 유한요소해석 모델을 구축하고 용접잔류응력을 반영한 응력 분포를 데이터베이스로 구축하는 것으로 하였으며, 가동중검사에서 균열이 발견되었을 경우 PWSCC 균열 성장 평가에 활용한다.

2.3.2. 표준 응력 해석

용접부는 상온 및 용융점 이상의 넓은 온도 범



Fig. 5 Scheme of stress analysis

위의 과도상태를 겪게 된다. 특히 다층 용접 시 용접부는 반복적인 용융, 응고 및 재용융 과정일 경험하기 때문에 용융 및 재용융 과정이 반복되면서 형성된 복잡한 온도구배 및 재료 물성 불일치, 용접 구조물의 구속조건, 등은 용접부에 잔류응력을 유발시킨다. 본 용접잔류응력은 PWSCC를 촉진시켜 용접구조물의 건전성을 저하시키는 주요 인자가 된다. 따라서 신뢰성 있는 용접 구조물 설계 및 파손 평가를 위해서는 용접으로 인한 잔류응력분포를 정확히 산출하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 Fig. 5에서와 같이 해석 대상 용접부에 대한 형상과 유한요소해석을 위한 다양한 변수들을 결정하고 과도 열해석을 수행한 후 온도분포 결과를 바탕으로 용접잔류응력을 계산하고 수압시험 및 정상운전 조건 등 운전 하중이력을 반영하여 용접부에서의 최종 응력을 계산하는 표준 응력 해석 절차를 개발하여 활용하였다.

2.3.3 응력확대계수

용접잔류응력과 시험 및 정상 운전조건, 노즐하중 등을 반영한 축방향 또는 원주방향 최종 응력 분포를 토대로 ASME B&PV Code, Sec. XI Appendix A-3320에 제시된 식 (1)에 따라 응력확대계수 (K_t)를 계산한다.⁽³⁾ 이때 원주방향 균열에 대해서는 축방향 응력 분포를, 축방향 균열에 대해서는 원주방향 응력 분포를 활용한다.

$$K_t = [(A_0 + A_p)G_0 + A_1G_1 + A_2G_2 + A_3G_3] \sqrt{\pi a / Q} \quad (1)$$

$$\sigma(x) = A_0 + A_1(x/a) + A_2(x/a)^2 + A_3(x/a)^3 \quad (2)$$

$$Q = 1 + 4.593(a/l)^{1.65} - q_y \quad (3)$$

$$q_y = [((A_0 + A_p)G_0 + A_1G_1 + A_2G_2 + A_3G_3) / \sigma_{ys}]^2 / 6 \quad (4)$$

여기서,

$$K_t = \text{stress intensity factor in } MPa\sqrt{\pi a}$$

$$a = \text{flaw depth}$$

A_0, A_1, A_2, A_3 = coefficient of Eq. (2) that represent the distribution over the flaw depth, $0 \leq x/a \leq 1$. When calculating K_I as a function of flaw depth, a new set of the coefficients A_0 through A_3 shall be determined for each new value of flaw depth

A_p = the internal vessel pressure p for the internal surface flaws

G_0, G_1, G_2, G_3 = free surface correction factors from ASME Sec. XI Appendix Table A-3320-1

Q = flaw shape parameter

l = flaw length

a/l = the flaw aspect ratio, $0 \leq a/l \leq 0.5$

q_y = the plastic zone correction factor

σ_{ys} = the material yield strength, 이다.

2.3.4. PWSCC 균열 성장 평가

균열 성장 평가에서 피로에 의한 성장과 응력부식균열에 의한 성장을 함께 고려해야 하나 본 연구 대상인 이중금속 맞대기 용접부의 경우 피로에 의한 성장이 PWSCC 균열 성장에 비교하여 매우 작은 균열성장 거동을 보이는 것으로 확인되어 PWSCC 성장만 고려하는 것으로 하였다.

PWSCC 균열 성장은 ASME B&PV Code, Sec. XI Appendix C-8511 에 제시된 식 (5)에 따라 계산하며, Table C-8510-1 로 부터 맞대기 용접재료인 Alloy 182 에 대한 상수를 적용한다.⁽⁴⁾

$$\frac{da}{dt} = \exp\left[-\frac{Q_g}{R_g}\left(\frac{1}{T_{abs}} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right] \Phi(K_I - K_{Ith})^\eta \quad (5)$$

여기서,

da/dt = SCC crack growth rate in m/s

K_{Ith} = threshold stress intensity factor for SCC, 0

Q_g = thermal activation energy for SCC crack growth, 130 $kJ/mole$

R_g = universal gas constant, $8.314 \times 10^{-3} kJ/(mole \cdot K)$

T_{abs} = absolute metal operating temperature in K

T_{ref} = absolute reference temperature for SCC, 598.15

Φ = crack growth rate coefficient, 1.5×10^{-12}

η = SCC crack growth rate exponent, 1.6, 이다

2.3.5. 허용 균열 크기 평가

맞대기 이중금속 용접부의 경우 연성용접재료인 Alloy 82/182 가 사용되었으므로 ASME B&PV Code, Sec. XI Appendix C-5000⁽⁵⁾ 또는 C-6000⁽⁶⁾에 따라 허용 균열 크기를 평가한다. Alloy 82 는 GTAW(Gas

Table 2 Example of allowable flaw depth-to-thickness ratio for Service Level A condition

Stress Ratio [Note (2)]	Ratio of Flaw Length to Pipe Circumference $l_p/\pi D$ [Note (3)]							0.75 or Greater
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	
≥ 0.60	0.75	[Note (4)]	[Note (4)]	[Note (4)]	[Note (4)]	[Note (4)]	[Note (4)]	[Note (4)]
0.55	0.75	0.44	0.23	0.16	0.13	0.12	0.11	0.11
0.50	0.75	0.75	0.44	0.31	0.25	0.23	0.21	0.21
0.45	0.75	0.75	0.65	0.46	0.37	0.33	0.31	0.30
0.40	0.75	0.75	0.75	0.59	0.48	0.42	0.39	0.38
0.35	0.75	0.75	0.75	0.73	0.58	0.51	0.47	0.46
0.30	0.75	0.75	0.75	0.75	0.69	0.60	0.55	0.52
0.25	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.68	0.63	0.59
0.20	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.70	0.65
0.15	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.74
≤ 0.10	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75

Tungsten Arc Welding) 에 사용되는 용접봉으로 한계하중평가법인 C-5000 에 따라 평가하며, Alloy 182 는 SMAW(Shield Metal Arc Welding) 에 사용되는 용접봉으로 플럭스로 도포되어 있기 때문에 탄소성과피괴역학(EPFM) 평가법인 C-6000 에 따라 평가한다. 이중금속 맞대기 용접부의 경우 초층은 Alloy 82 를 사용하며 나머지 층은 Alloy 182 를 사용하고 있으므로 용접부의 대부분을 차지하는 Alloy 182 를 기준으로 C-6000 에 따라 평가하였다.

ASME B&PV Code, Sec. XI Appendix C-6000 에는 해석을 통한 평가 방법 (Analytical Solution) 과 도표를 통한 방법 (Tabular Solution)이 제시되어 있는데, 해석을 통한 평가 방법에서 축방향 균열에 대한 평가 방법이 제시되지 않았다. 따라서 PWSCC 균열건전성평가의 일관성을 위해 원주방향 균열과 축방향 균열 모두에 대해 도표를 통한 방법으로 허용 균열 깊이를 평가하는 것으로 하였다.

원주방향 균열에 대한 허용 결함 깊이는 ASME B&PV Code, Sec. XI Appendix C-5310 에 제시된 Table C-5310-1~5 을 통해 결정한다. 이때 재료 및 형상에 따른 Z-factor 를 고려하여 응력비(Stress Ratio)를 결정하고 이를 Table C-5310-1~5 에 적용하여 허용 결함 깊이를 결정한다. Table 2 는 ASME B&PV Code, Sec. XI Appendix Table C-5310-1~4(조합하중, 운전조건 A, B, C, D) 및 Table C-5310-5(막응력)의 대표 도표로 Level A 에 해당하는 Table C-5310-1 을 제시한 것이다.

Table 2 의 세로축에 제시된 Stress Ratio 는 조합하중에 대해서는 아래 식 (6)에 따라 운전조건(A~D) 별로 계산하며, 막응력에 대해서는 식 (7)에 따라 계산한다.

$$\text{Stress Ratio} = Z[\sigma_m + \sigma_b + \sigma_e / SF_b] / \sigma_f \quad (6)$$

$$\text{Stress Ratio} = Z\sigma_m / \sigma_f \quad (7)$$

여기서,

Z = Z-factors load multipliers for alloy 600 and associated weld materials alloys 82, 182

- for $50 \text{ mm} \leq D \leq 203 \text{ mm}$

$$Z = 3.967 \times 10^{-8} D^3 - 2.148 \times 10^{-5} D^2 + 0.004071D + 0.902 \quad (8)$$

- for 203 mm $D \le 1016\text{ mm}$

$$Z = 1.343 \times 10^{-10} D^3 - 3.10 \times 10^{-7} D^2 + 2.52 \times 10^{-4} D + 1.1355 \quad (9)$$

SF_b = structural factor on primary bending stress, 2.3,

2.0, 1.6 and 1.4 for Service Level A, B, C and D

σ_m = primary membrane stress

σ_b = primary bending stress

σ_e = secondary bending stress

σ_f = flow stress, $(\sigma_{ys} + \sigma_u)/2$, 이다.

σ_m , σ_b , σ_e 등은 해당 배관 응력해석보고서에 제시된 운전조건(A~D)별 하중을 활용하여 식 (10)~(12)에 따라 계산한다.⁽⁷⁾

$$\sigma_m = \frac{F_x}{A} \quad (10)$$

$$\sigma_b = \left(\sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2} \right) / Z_{s.m.} \quad (11)$$

$$\sigma_e = F_x / A + \left(\sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2} \right) / Z_{s.m.} \quad (12)$$

여기서,

A = area of pipe

$Z_{s.m.}$ = section modulus of pipe, 이다.

Table 2 의 가로축에 제시된 Ratio of flaw length to Pipe Circumference($l_f / \pi D$)의 l_f 는 균열이 초기 균열 형상비를 유지하는 상태로 성장하는 것을 가정하여 도출되는 값이다.

축방향 균열에 대한 허용 결함 깊이는 ASME B&PV Code, Sec. XI Appendix C-6410 에 제시된 Table C-6410-1(운전조건 A, B)~2(운전조건 C, D)을 통해 결정한다. 이때 재료 및 형상에 따른 Z-factor 를 고려하여 응력비(Stress Ratio)를 결정하고 이를 Table C-6410-1~2 에 적용하여 허용 결함 깊이를 결정한다. Table 3 은 ASME B&PV Code, Sec. XI Appendix Table C-6410-1~2 의 대표 도표로 Level A/B 에 해당하는 Table C-6410-1 을 제시한 것이다.

단 Table 3 의 세로축에 제시된 Stress Ratio 는 식 (13)에 따라 계산한다.

$$\text{Stress Ratio} = \sigma_h / 124 \text{ (MPa)} \quad (13)$$

$$\sigma_h = pR_m / t \quad (14)$$

여기서,

R_m = mean pipe radius

p = internal pressure, 이다.

단, Table 3 의 가로축에 제시된 Non-dimensional Flaw Length($l_f / (R_m t)^{0.5}$)에서의 l_f 는 식 (15)의 l_{allow} 를 초과하지 않아야 한다.

$$l_{allow} = 1.58(R_m t)^{0.5} [(\sigma_f / \sigma_h)^2 - 1]^{0.5} \quad (15)$$

3. PWSCC 균열건전성평가 시스템

상기에서 구축되는 응력 해석 결과 및 균열건전성평가 기준에 기반하여 웹기반 PWSCC 균열건전성평가용 전산 시스템(NACIASys, Nickel Alloy Crack Integrity Assessment System)을 개발하였다. 이는 이종금속 맞대기용접부 뿐만 아니라 원자로압력용기 헤드 관통노즐에 대한 가동중검사에서 PWSCC 균열이 발견되었을 경우 동 전산 시스템을 활용하여 신속하게 안전운전 가능 여부를 판단하는데 활용하고자 한다.

Fig. 6 은 NACIASys 의 간략한 구성을 나타내고 있으며, 1) 가동중검사에서 균열이 발견되었을 경우 본 시스템에 접속하여 2) 발전소별로 구축된 용접잔류응력 데이터베이스로부터 평가대상 위치를 선택하고 3) 발견된 균열의 크기 및 방향을 변수로 4) PWSCC 균열 성장 곡선을 생성한 후 5) 허용 균열 크기에 도달하기까지의 계속 운전 허용 시간을 도출하는 절차로 사용된다.

Fig. 7 은 NACIASys 에 접속하여 평가 대상 호기 및 균열 위치를 선택한 후 균열의 크기 및 방향을 입력하는 화면이다.

Fig. 8 은 허용 균열 크기에 도달하기까지의 계

Table 3 Example of allowable flaw depth-to-thickness ratio for Service Level A and B conditions including Test

Stress Ratio	Nondimensional Flaw Length, $l_f / (R_m t)^{0.5}$ [Note (3)]														
	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8
≥ 0.80	0.75	0.50	0.12	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)
0.75	0.75	0.60	0.38	0.15	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)
0.70	0.75	0.70	0.59	0.30	0.27	0.19	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)
0.65	0.75	0.75	0.70	0.38	0.33	0.28	0.23	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)
0.60	0.75	0.75	0.68	0.51	0.38	0.35	0.32	0.26	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)
0.55	0.75	0.75	0.75	0.62	0.48	0.43	0.39	0.37	0.36	0.29	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)
0.50	0.75	0.75	0.75	0.71	0.51	0.49	0.47	0.44	0.42	0.41	0.34	(4)	(4)	(4)	(4)
0.45	0.75	0.75	0.75	0.75	0.68	0.62	0.57	0.54	0.52	0.50	0.49	0.48	0.39	(4)	(4)
≤ 0.40	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.70	0.66	0.63	0.61	0.59	0.58	0.57	0.56	0.45	(4)

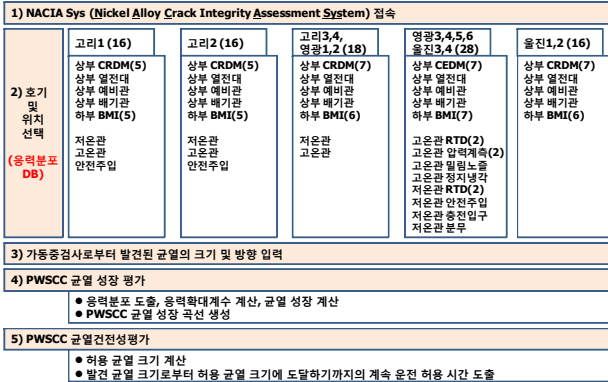


Fig. 6 Scheme of nickel alloy crack integrity assessment system

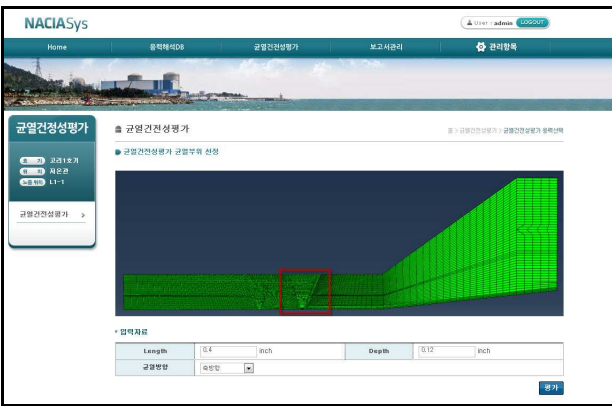


Fig. 7 Input of depth, length and direction of crack

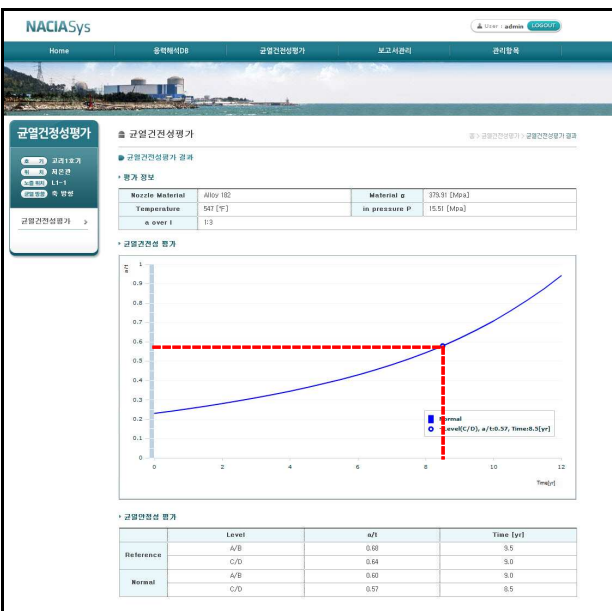


Fig. 8 Result of PWSCC crack evaluation

계속 운전 허용 시간을 도출하는 PWSCC 건전성 평가 결과 화면이며, 평가대상 호기의 저온관 이중금속 맞대기용접부에서 발견된 깊이 0.12 inch ($a/t=0.23$), 길이 0.4 inch 의 축방향 균열은 운전 조건 C/D 에 대해 허용되는 균열 깊이($a/t=0.57$)에 도달하기까지 향후 8.5 년간 계속 운전이 허용됨을 보여 준다.

4. 결론

본 연구에서는 이중금속 맞대기 용접부 PWSCC 균열건전성평가 기술을 정립하고 전산 시스템으로 구현함으로써 원자로압력용기 주변 주요 이중금속 맞대기 용접부에서의 PWSCC 균열에 대한 공학적 건전성평가 수단을 확보하고자 하였다.

이를 통해 원전 안전운전에 기여할 뿐만 아니라 신속한 건전성평가로 원전 이용률 향상에 기여할 것으로 기대된다.

원전 이중금속 용접부의 PWSCC 균열건전성평가 전산 시스템은 2012 년 상반기 중 검증과 보완을 통해 개발을 완료하고 표준 응력해석 및 PWSCC 균열건전성평가 절차를 발전소에 적용하기 위해 규제기관 인허가를 추진할 계획이다.

참고문헌

- (1) EPRI, 2004, "Materials Reliability Program: Welding Residual and Operation Stresses in PWR Alloy 182 Butt Welds (MRP-106)," EPRI Report
- (2) ASME B&PV Code, 2010, Section XI, IWB-2500, "Examination and Pressure Test Requirements."
- (3) ASME B&PV Code, 2010, Section XI, Non-mandatory Appendix A, "Analysis of Flaws."
- (4) ASME B&PV Code, 2010, Section XI, Non-mandatory Appendix C, "Evaluation of Flaws in Piping."
- (5) ASME B&PV Code, 2010, Section XI, Non-mandatory Appendix C, Article C-5000, "Flaw Evaluation for Fully-Plastic Fracture Using Limit Load Criteria."
- (6) ASME B&PV Code, 2010, Section XI, Non-mandatory Appendix C, Article C-6000, "Flaw Evaluation for Ductile Fracture Using EPFM Criteria."
- (7) Westinghouse, 2007, "Flaw Evaluation Handbook for KORI Unit 1 Reactor Vessel Safety Injection Nozzle Dissimilar Metal Weld and Alloy 600 Safe End Regions."