

KEPIC 적용사례 : MI-C-106(N-694-1)

(승인일자 : 2010. 10. 12)

(재 승인일자 : 2020. 12. 31)

KEPIC Code Case : MI-C-106(N-694-1)

(Approval Date: 10. 12, 2010)

(Reaffirmed : 12. 31, 2020)

**제목 : 원자로용기 경판 관통노즐에 대한
평가절차 및 합격기준****Subject : Evaluation Procedure and Acceptance
Criteria for PWR Reactor Vessel Head
Penetration Nozzles****질문 :**

결점이 있는 원자로용기 경판 관통노즐을 보수하지 않고 계속 운전하는 것을 정당화하기 위하여 어떤 평가 절차를 사용할 수 있는가?

Inquiry:

What evaluation procedure may be used to justify continued operation without repair of flawed PWR reactor vessel head penetration nozzles?

답변 :

보수하지 않고 계속 운전하는 것을 정당화하기 위하여 다음의 평가 절차를 사용할 수 있다.

Reply:

It is the opinion of the Committee that the following evaluation procedure may be used to justify continued operation without repair.

1.0 적용범위

지시를 포함하고 있는 상부 및 하부 경판 관통노즐은 계속 사용에 대한 적합성을 결정하기 위해 이 적용사례의 평가절차 및 합격기준에 따라 평가될 수 있다. 평가절차와 합격기준은 발전사업자의 책임사항이다. 이 부위의 지시를 허용하기 위하여 MIB 3500의 합격표준을 사용할 수 없다는 것에 주의하여야 한다.

1.0 SCOPE

Upper and lower head penetration nozzles containing indications may be evaluated to determine acceptability for continued service in accordance with the evaluation procedures and acceptance criteria of this Case. The evaluation procedures and acceptance criteria shall be the responsibility of the Owner. Note that the acceptance standards of MIB 3500 cannot be used to accept indications in this region.

2.0 평가절차

평가절차는 호칭외경이 8 in. (200mm) 이하인 경판 관통노즐에 적용할 수 있다. 이 절차는 노즐-용기 부분용입 용접부(J-홈)에 사용할 수 없다.

2.0 EVALUATION PROCEDURES

This evaluation procedure is applicable to head penetration nozzles with 8 in. (200 mm) nominal outside diameter and less. This procedure shall not be used for partial penetration nozzle to vessel (J-groove) welds.

2.1 평가방법론

(1) 검출된 각각의 결점에 대해 가능한 한 규정된 평가기간 동안의 피로, 응력부식균열 또는 두 가지 모두에 의한 최대 성장을 결정하기 위하여 결점성장 해석을 수행하여야 한다. 결점성장평가를 위한 최소

2.1 Methodology for Evaluation

(1) A flaw growth analysis shall be performed on each detected flaw to determine its maximum growth due to fatigue, stress corrosion cracking or both mechanisms, when applicable, during a specified evaluation period. The

기간은 차기검사까지는 되어야 한다.

(2) 균열성장을 계산하는데 있어서, 용접잔류응력을 포함한 모든 적용 가능한 부하를 고려하여야 한다.

(3) 표면결점에 대한 그림 MIA 3400-1의 근접성 평가 규칙을 포함하여 MIA 3400의 요건에 따라 결점을 특성화하여야 한다.

(4) 결점을 축방향 및 원주방향으로 투영하고, 각 방위를 평가하여야 한다. 축방향 방위는 각 노즐에 대하여 동일하지만, 원주방향 방위는 경판과 관통노즐의 교차각에 따라 변화한다. 원주방향방위는 그림 2-1에 정의되어 있다.

(5) J-홈 부착물 용접부와 관련된 결점의 위치를 결정하여야 한다.

(6) 아래의 임계결점 변수를 계산하기 위하여 부록 A에 기술된 것과 같은 해석 절차를 사용하여 결점을 평가하여야 한다.

a_f = 검출된 결점이 평가기간의 말기에 성장할 것으로 계산된 최대 깊이

ℓ_f = 검출된 결점이 평가기간 말기에 성장할 것으로 계산된 최대 길이

3.0 합격기준

평가기간의 말기에 성장할 것으로 계산되는 최대 결점 크기를 표 3-1의 최대허용결점 크기와 비교하여야 한다.

minimum time interval for the flaw growth evaluation shall be until the next inspection.

(2) All applicable loadings shall be considered, including weld residual stress, in calculating the crack growth.

(3) The flaw shall be characterized in accordance with the requirements of MIB 3400, including the proximity rules of Fig. MIB 3400-1 for surface flaws.

(4) The flaw shall be projected into both axial and circumferential orientations, and each orientation shall be evaluated. The axial orientation is the same for each nozzle, but the circumferential orientation will vary depending on the angle of intersection of the penetration nozzle with the head. The circumferential orientation is defined in Fig. 2-1.

(5) The location of the flaw, relative to the J-groove attachment weld, shall be determined.

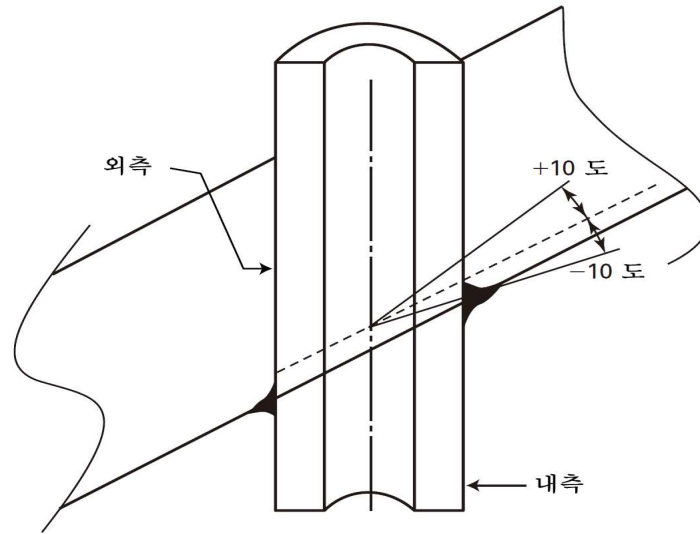
(6) The flaw shall be evaluated using analytical procedures, such as those described in Appendix A, to calculate the following critical flaw parameters:

a_f = the maximum depth to which the detected flaw is calculated to grow at the end of the evaluation period

ℓ_f = the maximum length to which the detected flaw is calculated to grow at the end of the evaluation period

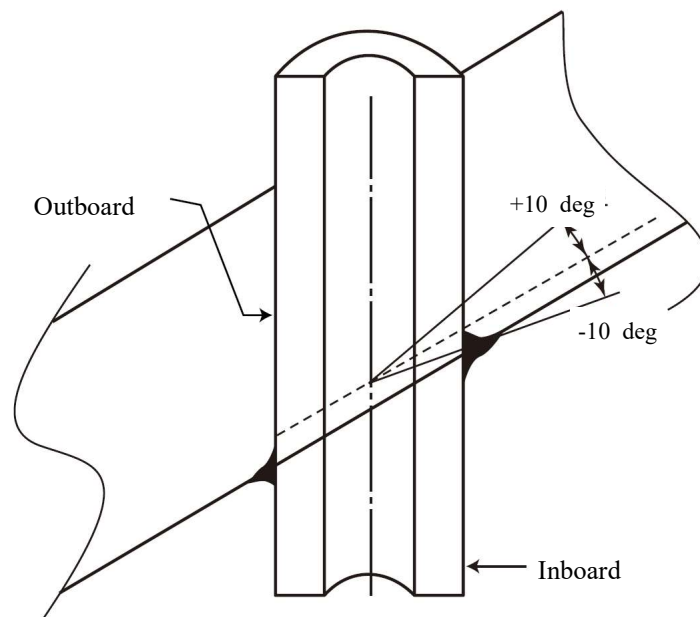
3.0 ACCEPTANCE CRITERIA

The calculated maximum flaw dimensions at the end of the evaluation period shall be compared with the maximum allowable flaw dimensions in Table 3-1.



비고 : 그림에서 점선으로 표시된 J-홈 용접 루트에 의해 형성된 평면과 10도 이내의 각을 가지는 평면결점은 원주방향결점으로 간주하여야 한다.

그림 2-1 결점특성에 대한 원주방향 방위의 정의



GENERAL NOTE:

Planar flaws within 10 deg of the plane formed by the J-groove weld root, shown as the dashed line, shall be considered circumferential flaws..

FIG. 2-1 - DEFINITION OF CIRCUMFERENTIAL ORIENTATION FOR FLAW CHARACTERIZATION

표 3-1 원자로용기 경판 관통노즐 합격기준

위치	축방향		원주방향	
	a_f	ℓ_f	a_f	ℓ_f
용접부 내측(내경) ^{<1>}	t	무제한	t	0.75 Circ.
용접부 외측(내경)	$0.75 t$	무제한	<2>	<2>
용접부 내측(외경) ^{<1>}	t	무제한	t	0.75 Circ.
용접부 외측(외경)	<2>	<2>	<2>	<2>

비고 <가> 부분용입 노즐-용기 (J-홈) 용접부에 존재하는 선형 표면결점은 크기에 관계없이 불합격이다.

<나> t = 경판 관통노즐의 벽두께

<다> 용접부의 내측은 압력유지부가 아니다.

<라> 용접부와 외측은 압력유지부이다.

주 <1> 노즐 내에서 교차하는 축방향과 원주방향 결점은 불합격이다.

<2> 사례별 평가가 요구되고, 합격기준은 발전사업자에 의해 증명되어야한다.

TABLE 3-1 - REACTOR VESSEL HEAD PENETRATION NOZZLE ACCEPTANCE CRITERIA

Location	Axial		Circumferential	
	a_f	ℓ_f	a_f	ℓ_f
Inboard of Weld (ID) [Note (1)]	t	No Limit	t	0.75 Circ.
At and Outboard of Weld (ID)	$0.75 t$	No Limit	[Note (2)]	[Note (2)]
Inboard of Weld (OD) [Note (1)]	t	No Limit	t	0.75 Circ.
At and Outboard of Weld (OD)	[Note (2)]	[Note (2)]	[Note (2)]	[Note (2)]

GENERAL NOTES:

(a) Linear surface flaws of any size in the partial penetration nozzle to vessel (J-groove) welds are not acceptable.

(b) t p wall thickness of head penetration nozzle.

(c) Inboard of the weld is not part of the pressure boundary.

(d) At and outboard of the weld is part of the pressure boundary.

NOTES:

(1) Intersecting axial and circumferential flaws in the nozzle are not acceptable.

(2) Requires case-by-case evaluation. Acceptance criteria shall be justified by the Owner.

임의요건 부록 A

원자로용기 경판 관통노즐의 결점 평가

A 1000 개요

A 1100 적용범위

(1) 이 부록은 원자로용기 경판 관통노즐의 계속 사용 여부를 결정하기 위한 방법을 제공한다. 이 평가방법론은 상부관통노즐이 극한하중에 도달하는 능력이 보증되는 연성재료라는 결론에 근거를 둔다. 결점은 선택된 평가된 기간 끝에서의 최대 허용결점 크기와 결점성장해석으로 결정한 최대 결점 크기를 비교하여 평가되어야 한다.

(2) 이 부록은 결점 모델링 및 평가를 위한 규칙을 규정한다. 결점성장해석은 평가대상 결점에 적절한 피로, 응력부식균열, 또는 둘 모두에 의한 성장에 근거를 둔다. 3.0의 결점 합격기준은 소성극한하중 파손의 구조적 여유를 규정한다. 이 기준을 사용하여 결점이 있는 상부 관통노즐이 차기검사까지 계속 사용될 수 있는지를 결정할 수 있다. 또는 반대로 차기 검사 때까지의 기간을 결정하는데 사용할 수 있다.

A 1200 절차

다음은 해석적 절차를 요약한 것이다.

- (1) MIA 3000에 따라 측정된 결점으로부터 실제 결점 형상을 결정한다.
- (2) A 2000을 사용하여, 실제 결점을 원주 및 축방향 결점 성분으로 분해한다.
- (3) 용접잔류응력을 포함한 A 및 B급 운전한계 조건에 대한 검출된 결점의 위치에서의 응력을 결정한다.
- (4) A 3000에 명시된 해석적 절차를 사용하여 결점변수 a_f 및 ℓ_f 를 결정한다.
- (5) 결점변수 a_f 및 ℓ_f 를 사용하여 결점이 있는 노

NONMANDATORY APPENDIX A

EVALUATION OF FLAWS IN PWR REACTOR VESSEL HEAD PENETRATION NOZZLES

A-1000 INTRODUCTION

A-1100 SCOPE

(1) This Appendix provides a method for determining the acceptability for continued service of pressurized water reactor vessel head penetration nozzles. The evaluation methodology is based on the conclusion that head penetration nozzles are ductile materials, where the ability to reach limit load is assured. Flaws shall be evaluated by comparing the maximum flaw dimensions determined by flaw growth analysis with the maximum allowable flaw dimensions at the end of a selected evaluation period.

(2) This Appendix provides rules for flaw modeling and evaluation. Flaw growth analysis is based on growth due to fatigue, stress corrosion cracking (SCC), or both, as appropriate to the flaw under evaluation. The flaw acceptance criteria of 3 provide a structural margin on failure for plastic limit load. The criteria may be used to determine the acceptability of flawed head penetration nozzles for continued service until the next inspection, or conversely, to determine the time interval until a subsequent inspection.

A-1200 PROCEDURE

The following is a summary of the analytical procedure.

- (1) Determine the actual flaw configuration from the measured flaw in accordance with MIA 3000.
- (2) Using A-2000, resolve the actual flaw into circumferential and axial flaw components.
- (3) Determine the stresses at the location of the detected flaw for Service Levels A and B conditions including weld residual stresses.
- (4) Using the analytical procedures described in A-3000, determine the flaw parameters a_f and ℓ_f .
- (5) Using the flaw parameters a_f and ℓ_f apply the

즐의 계속 사용 여부를 결정하기 위해 3의 결점 평가기준을 적용한다.

A 2000 해석을 위한 결점 모델

A 2100 적용범위

A 2000은 허용 결점크기와 비교하기 위해 사용되는 결점 형상, 다중 결점의 고려사항, 결점 방향, 및 결점 위치에 대한 기준을 규정한다.

A 2200 결점 형상

결점은 MIA 3300에 명시된 방법에 따라 직사각형 혹은 원주형 평면구역에 완전히 포함되어야 한다. 그림 A 2200-1 및 A 2200-2는 원주방향 및 축방향 결점의 결점 특성을 나타낸다.

A 2300 최인접 결점과의 근접성

여러 개의 결점이 주위에 존재하는 경우, 두개의 근접한 결점의 경계사이의 가장 가까운 거리가 MIA 3300에서 정한 근접 한계 값 이내에 있다면, 이들 인접결점은 MIA 3300에 따라 한 개의 직사각형 또는 원주형 평면구역에 포함되어야 한다.

A 2400 결점 방향

축방향¹⁾ 혹은 원주방향²⁾ 평면에 있지 않은 결점은 MIA 3340의 규정에 따라 이들 평면에 투영되어야 한다. 이러한 투영에 의해 얻어진 축방향 및 원주방향 결점은 A 3000에 따라 분리해서 평가되어야 한다.

A 2500 결점 위치

결함은 실제 위치에 있는 것으로 간주하여 해석을 해야 한다. 용접잔류응력을 포함한 적용 응력은 이 위치에서 결정되어야 한다. 결점 형태에 따라 표면 또는 표면직하결점인지를 결정하여 사용하여야 한다. 표면직하결점이지만 MIA 3340에 규정된 기기 표면 근접한계 이내에 존재할 경우, 결점은 표면결점으로 간주되어야 하고 표면을 기준으로 한 직사각형 또는 원주형 평면구역에 포함되어야 한다.

주 1) 노즐의 축과 평행한 평면

2) 그림 2-1에 나타난 것처럼 부착물 용접에 의해 형성된 면과 10° 이내로 평행한 평면

flaw evaluation criteria of 3 to determine the acceptability of the flawed nozzle for continued service.

A-2000 FLAW MODEL FOR ANALYSIS

A-2100 SCOPE

This Appendix provides criteria for flaw shape, consideration of multiple flaws, flaw orientation, and flaw location, which are used in the comparison with the allowable flaw size.

A-2200 FLAW SHAPE

The flaw shall be completely bounded by a rectangular or circumferential planar area in accordance with the methods described in MIA 3300. Figures A-2200-1 and A-2200-2 illustrate flaw characterization for circumferential and axial flaws.

A-2300 PROXIMITY TO CLOSEST FLAW

For multiple neighboring flaws, if the shortest distance between the boundaries of two neighboring flaws is within the proximity limits specified in MIA 3300, the neighboring flaws shall be bounded by a single rectangular or circumferential planar area in accordance with MIA 3300.

A-2400 FLAW ORIENTATION

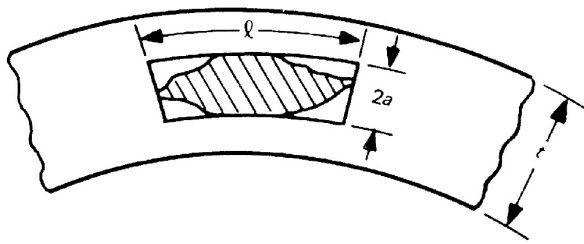
Flaws that do not lie in either and ¹⁾axial or a ²⁾ circumferential plane shall be projected into these planes in accordance with the provisions of MIA 3340. The axial and circumferential flaws obtained by these projections shall be evaluated separately in accordance with A-3000.

A-2500 FLAW LOCATION

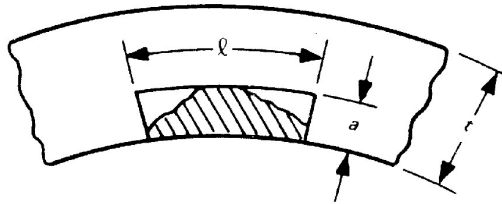
For the purpose of analysis, the flaw shall be considered in its actual location. The applicable stress, including weld residual stress, shall be determined at this location. Surface or subsurface flaw characterizations shall be used, depending on the type of flaw. If the flaw is subsurface but within the proximity limit of MIA 3340 of the surface of the component, the flaw shall be considered a surface flaw and bounded by a rectangular or circumferential planar area with the base on the surface.

Notes 1) A plane parallel to the nozzle axis.

2) A plane parallel, within ± 10 deg, of the plane of the attachment weld, as illustrated in Fig. 2-1.

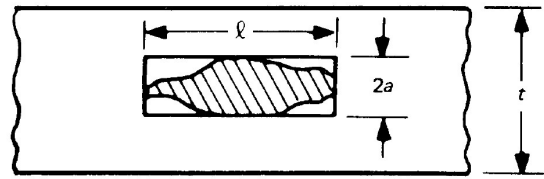


(가) 표면직하결점

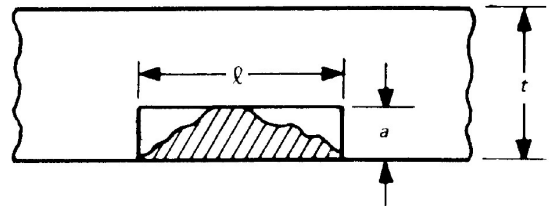


(나) 표면결점

그림 A 2200-1 결점 특성 - 원주방향 결점

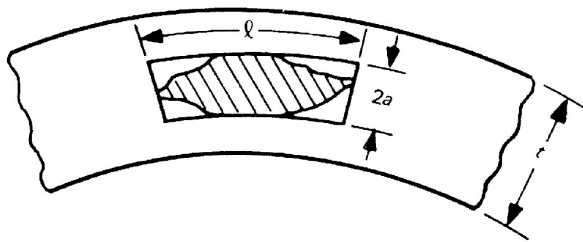


(가) 표면직하결점

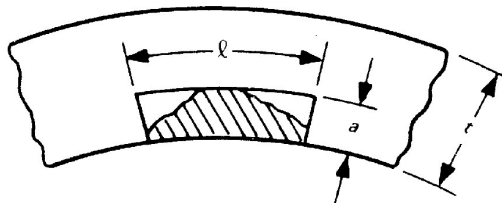


(나) 표면결점

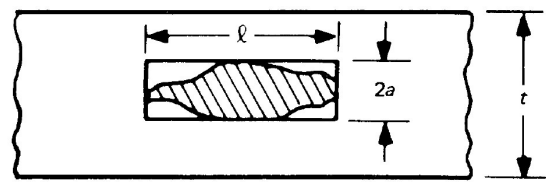
그림 A 2200-2 결점 특성 - 축방향 결점



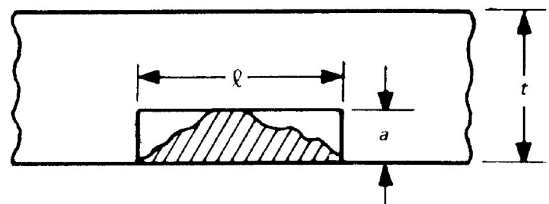
(a) Subsurface Flaw



(b) Surface Flaw

FIG. A-2200-1 FLAW CHARACTERIZATION—
CIRCUMFERENTIAL FLAWS

(a) Subsurface Flaw



(b) Surface Flaw

FIG. A-2200-2 FLAW CHARACTERIZATION—
AXIAL FLAWS

A 3000 해석

A 3100 적용범위

이 조항은 결점 평가에 대한 방법론을 규정하고, 평가된 기간 끝에서의 결점 크기를 결정하기 위한 절차를 기술한다.

A 3200 결점성장해석

(1) 검출된 결점이 평가된 기간의 마지막까지 결점 평면에서 성장할 최대 깊이 a_f 와 최대 길이 ℓ_f 가 결정되어야 한다. 이 부록은 결점성장해석에 대한 절차를 기술한다.

(2) 오스테나이트계 경관 관통 노즐에서의 균열 성장은 주기적인 피로 결점성장과 지속된 하중 하에서의 SCC 또는 두 개 모두의 조합에 의한 것일 수 있다. 결점성장해석은 MI 기술기준 부록 A의 A 5200에 정의된 것과 같이 정상 운전상태에 대해 수행되어야 한다. 결점성장은 적용된 응력확대계수에 의해 결정된다.

A 3210 응력확대계수 결정

이 영역에서의 총 응력은 전형적으로 비선형이기 때문에, 응력 분포는 식 (1)에 나타난 것처럼 3차원 다항식을 사용하는 것이 권고된다.

$$\sigma(x) = A_0 + A_1x + A_2x^2 + A_3x^3 \quad (1)$$

여기에서

x = 노즐 벽으로 들어가는 좌표 거리

σ = 균열의 평면에 수직인 응력

A_i = 3차 다항식 계수

주어진 길이 대 깊이 비를 가진 표면결점에 대해, Raju와 Newman¹⁾의 응력확대계수 식을 사용할 수 있다. 응력확대계수 $K_I(\Phi)$ 은 균열 전단을 따라 어느 곳에서도 계산될 수 있다. 다음의 식을 사용하여 $K_I(\Phi)$ 을 계산한다.

$K_I(\Phi)$ 의 단위는 $\text{MPa}\sqrt{m}$ 이다.

$$K_I = \left[\frac{\pi a}{Q} \right]^{0.5} \sum_{j=0}^3 G_j(a/c, a/t, t/R, \Phi) A_j a^j \quad (2)$$

여기에서

주 1) Newman, J.C. and Raju, I.S., Stress Intensity Factor Influence Coefficients for Internal and External Surface Cracks in Cylindrical Vessels, in Aspects of Fracture Mechanics in Pressure Vessels and Piping, PVP Vol.58, ASME 1982, pp. 37-48.

A-3000 ANALYSIS

A-3100 SCOPE

This Appendix provides the methodology for flaw evaluation and describes the procedures to determine the flaw size at the end of the evaluation period.

A-3200 FLAW GROWTH ANALYSIS

(1) The maximum depth a_f and the maximum length ℓ_f to which the detected flaw will grow in the plane of the flaw by the end of the evaluation period shall be determined. This Appendix describes the procedures for the flaw growth analysis.

(2) Crack growth in austenitic head penetration nozzles can be due to cyclic fatigue flaw growth, SCC under sustained load, or a combination of both. Flaw growth analysis shall be performed for normal operating conditions, as defined in KEPIC-MI, A-5200 of Appendix A. Flaw growth is governed by the applied stress intensity factor.

A-3210 Stress Intensity Factor Determination

Because the total stresses in this region are typically nonlinear, it is recommended that the distribution be fit to a cubic polynomial, as shown in eq. (1).

$$\sigma(x) = A_0 + A_1x + A_2x^2 + A_3x^3 \quad (1)$$

where

x = the coordinate distance into the nozzle wall

σ = stress perpendicular to the plane of the crack

A_i = coefficients of the cubic polynomial fit

For a surface flaw with a given ratio of length to depth, the stress intensity factor expression of Raju and Newman¹⁾ may be used. The stress intensity factor $K_I(\Phi)$ can be calculated anywhere along the crack front. The following expression is used for calculating $K_I(\Phi)$.

The units of $K_I(\Phi)$ are $\text{MPa}\sqrt{m}$.

$$K_I = \left[\frac{\pi a}{Q} \right]^{0.5} \sum_{j=0}^3 G_j(a/c, a/t, t/R, \Phi) A_j a^j \quad (2)$$

where

Note 1) Newman, J.C. and Raju, I.S., Stress Intensity Factor Influence Coefficients for Internal and External Surface Cracks in Cylindrical Vessels, in Aspects of Fracture Mechanics in Pressure Vessels and Piping, PVP Vol. 58, ASME 1982, pp. 37-48.

G_0, G_1, G_2, G_3 = 개략의 절차로부터 구한 인자

Φ = 균열 주위의 각 위치⁽³⁾

a = 균열 깊이

c = 균열 길이의 절반

t = 벽두께

R = 튜브의 내부 반경

Q = 주 (3)에 정의된 형상 인자

대안으로 응력확대계수를 계산하기 위해 MI 기술 기준 A 3000에 기술된 것과 같은 절차를 사용할 수 있다.

A 3220 피로에 의한 결점성장

(1) PWR 수질 환경에서 Alloy 600 재료의 피로 균열 성장률은 적용된 응력확대계수, K_I 의 범위의 향으로 특성을 기술할 수 있다. 이 특성은 다음의 형태가 되며:

$$da/dN = CS_R S_{ENV} \Delta K^n \quad (3)$$

여기에서 n 과 C 는 재료와 환경조건에 의존하는 상수이다. 이 변수들은 동일한 재료규격과 생산형태를 가지는 시험편 또는 적절한 대체 시험편으로부터 얻은 균열 성장 데이터에 기초한다. 데이터에 영향을 주는 재료의 변화성, 환경, 시험주기, 평균 응력 및 다른 변수들이 고려되어야 한다.

(2) Alloy 600 재료의 피로 균열 성장 거동은 온도, R 비(K_{min}/K_{max}) 및 환경에 의해 영향을 받는다. PWR 수질 환경에 대한 기준 피로균열 성장률을 식 (3)에 나타내었다.

$$C = 4.835 \times 10^{-14} + 1.622 \times 10^{-16} T - 1.490 \times 10^{-18} T^2 + 4.355 \times 10^{-21} T^3$$

$$ES_R = [1 - 0.82R]^{-2.2}$$

$$S_{ENV} = 1 + A [CS_R \Delta K^n]^{m-1} T_R^{1-m}$$

여기에서

$$A = 4.4 \times 10^{-7}$$

$$m = 0.33$$

$$n = 4.1$$

$$T = ^\circ\text{C}$$

$$\Delta K = \text{응력확대계수의 범위 MPa} \sqrt{m}$$

G_0, G_1, G_2, G_3 = factors obtained from the procedure outlined

Φ = angular location around the crack⁽³⁾

a = crack depth

c = half-crack length

t = wall thickness

R = inside radius of the tube

Q = shape factor as defined in note 3)

Alternatively, procedures such as those described in KEPIC-MI, A-3000 may be used to calculate the stress intensity factor.

A-3220 Flaw Growth Due to Fatigue

(1) The fatigue crack growth rate of Alloy 600 material in PWR water environments can be characterized in terms of the range of the applied stress intensity factor, K_I . This characterization is of the form:

$$da/dN = CS_R S_{ENV} \Delta K^n \quad (3)$$

where n and C are constants dependent on the material and environmental conditions. These parameters are based on crack growth data obtained from specimens of the same material specification and product form, or suitable alternative. Material variability, environment, test frequency, mean stress, and other variables that affect the data shall be considered.

(2) The fatigue crack growth behavior of Alloy 600 materials is affected by temperature, R ratio (K_{min}/K_{max}), and environment. Reference fatigue crack growth rates for PWR water environments are given by eq. (3).

$$C = 4.835 \times 10^{-14} + 1.622 \times 10^{-16} T - 1.490 \times 10^{-18} T^2 + 4.355 \times 10^{-21} T^3$$

$$ES_R = [1 - 0.82R]^{-2.2}$$

$$S_{ENV} = 1 + A [CS_R \Delta K^n]^{m-1} T_R^{1-m}$$

where

$$A = 4.4 \times 10^{-7}$$

$$m = 0.33$$

$$n = 4.1$$

$$T = \text{degrees C}$$

$$\Delta K = \text{range of stress intensity factor MPa} \sqrt{m}$$

$$R = K_{\min}/K_{\max}$$

T_R = 상승시간, 30초로 설정

$$da/dN = m/\text{cycle}$$

(3) 정상 운전상태 동안 검출된 결점의 피로결점 성장에 대한 최대 잠재력을 결정하기 위해, 노즐의 누적 피로결점성장 연구가 수행되어야 한다. 평가기간 동안 적용하는 계통 설계시방서에 규정된 설계 과도상태가 포함되어야 한다. 각 과도상태는 다음과 같은 개략적 순서에 따라 고려되어야 한다.

(가) ΔK (과도현상에 관련된 K_I 변동 최대 범위)를 결정한다.

(나) 피로결점성장률 데이터로부터 ΔK 에 해당하는 결점성장 값 증분을 구한다.

(다) 결점 크기를 최신정보로 수정하고, 다음 과도상태로 진행한다.

A 3230 응력부식균열에 의한 결점성장

(1) SCC에 의한 결점성장은 재료상태, 환경, 지속적인 하중에 의한 응력확대계수 및 결점이 지속적인 하중의 환경에 노출된 총 시간의 함수이다. SCC 결점성장을 계산하기 위한 절차는 결점성장률(da/dt)이 지속적인 하중 응력확대계수 K_I 에 관련되는 실험 데이터에 근거를 두고 있다. 압력 및 정상상태의 열응력뿐만 아니라 용접 잔류응력으로부터 초래되는 지속적인 하중이 포함되어야 한다. 누적 결점성장을 결정하는데 사용되는 절차는 다음과 같다.

(가) 주어진 정상상태 응력조건에 대한 응력확대계수 K_I 를 결정한다.

(나) 정상상태 응력이 적용되는 기간에 대응되는 결점 깊이 및 길이의 증분 성장을 계산한다. 이것은 da/dt 와 K_I 사이의 관계로부터 얻을 수 있다. 충분히 작은 시간 간격을 선택하여 결점 크기 및 관련된 K_I 값이 이 간격동안 크게 변하지 않는다는 것을 보증해야 한다.

(다) 결점 크기를 최신 정보로 수정한다.

(라) 응력이 존재하는 기간에 대하여 평가 기간의 끝까지 결점성장해석을 계속한다.

$$R = K_{\min}/K_{\max}$$

T_R = rise time, set at 30 sec

$$da/dN = m/\text{cycle}$$

(3) To determine the maximum potential for fatigue flaw growth of the detected flaw during normal operating conditions, a cumulative fatigue flaw growth study of the nozzle shall be performed. The design transients prescribed in the system Design Specification that apply during the evaluation period shall be included. Each transient shall be considered in approximate chronological order as follows:

(a) Determine ΔK , the maximum range of K_I fluctuation associated with the transient.

(b) Find the incremental flaw growth corresponding to ΔK from the fatigue flaw growth rate data.

(c) Update the flaw size and proceed to the next transient.

A-3230 Flaw Growth Due to Stress Corrosion Cracking

(1) Flaw growth due to SCC is a function of the material condition, environment, the stress intensity factor due to sustained loading, and the total time that the flaw is exposed to the environment under sustained loading. The procedure for computing SCC flaw growth is based on experimental data relating the flaw growth rate (da/dt) to the sustained load stress intensity factor K_I . Sustained loads resulting from pressure and steady state thermal stresses, as well as weld residual stresses, shall be included. The procedure used for determining the cumulative flaw growth is as follows:

(a) Determine the stress intensity factor K_I for a given steady state stress condition.

(b) Calculate the incremental growth of the flaw depth and length corresponding to the period for which the steady state stress is applied. This can be obtained from the relationship between da/dt and K_I . A sufficiently small time interval shall be selected to ensure that the flaw size and the associated K_I value do not change significantly during this interval.

(c) Update the flaw size.

(d) Continue the flaw growth analysis for the period during which the stress exists until the end of the

(2) 상기 절차는 SCC 결점성장만을 고려하여 평가 기간의 끝에서의 최종 결점크기 a_f 및 ℓ_f 를 산출한다.

그림 A 3230-1은 K_I 은 K_{th} 보다 큰 경우, 식 (4)에 의해 주어진 응력확대계수에 대한 균열 성장률을 나타낸다.

evaluation period.

(2) The above procedure yields the final flaw size, a_f and ℓ_f , at the end of the evaluation period, considering SCC flaw growth alone. Figure A-3230-1 presents the crack growth rate versus stress intensity factor plot given by eq. (4), when K_I is greater than K_{th} .

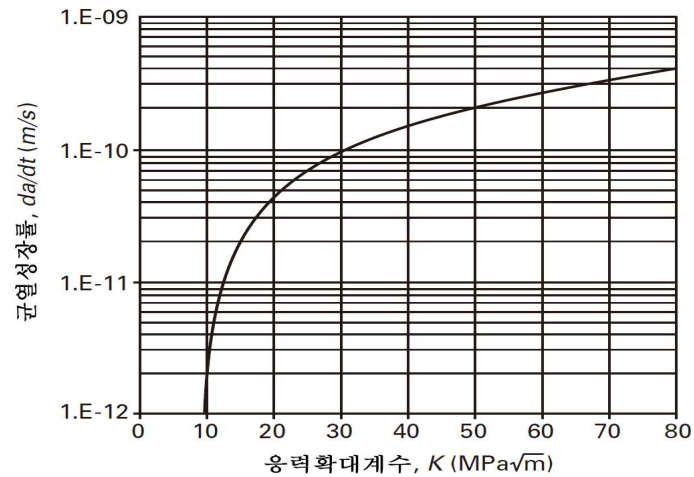


그림 A 3230-1 Alloy 600 원자로용기 경판 관통 노즐에서 SCC의 예측을 위한 권고 곡선

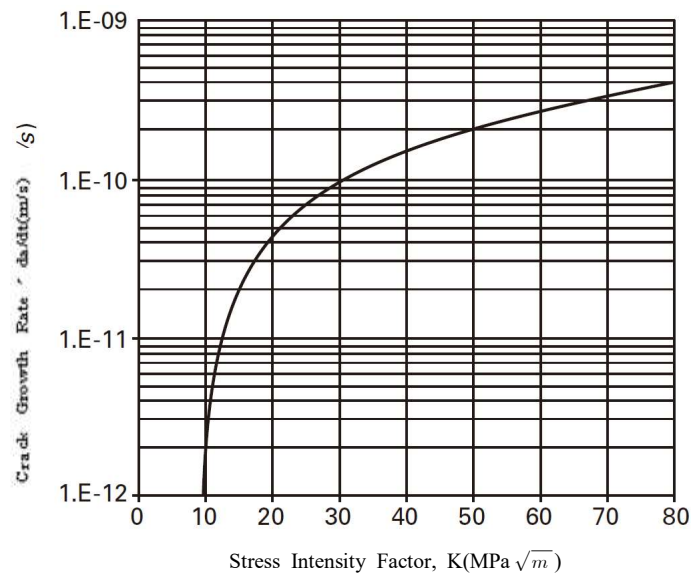


FIG. A-3230-1 RECOMMENDED CURVE FOR PREDICTION OF SCC IN ALLOY 600 REACTOR VESSEL HEAD PENETRATION NOZZLES

$$\dot{a} = \exp \left[-\frac{Q_g}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \alpha (K_I - K_{th})^\beta \quad (4)$$

여기에서

\dot{a} = 온도 T에서 균열 성장률, m/s
 Q_g = 균열 성장에 대한 열적 활성화 에너지
 = 130kJ/mole
 R = 일반 기체 상수 (universal gas constant)
 = 8.314×10^{-3} kJ/mole K
 T = 균열 위치에서 절대 운전 온도, K

T_{ref} = 데이터를 규격화하기 위해 사용되는 절대 기준온도
 = 598.15 K

α = 균열 성장률 계수
 = m/s 단위의 \dot{a} 과 MPa \sqrt{m} 단위의 K_I 에 대하여 325°C에서 2.67×10^{-12}

K_I = 균열선단 응력확대계수, MPa \sqrt{m}

K_{th} = SCC에 대한 균열선단 응력확대계수 문턱 값
 = 9 MPa \sqrt{m}

β = 지수
 = 1.16

K_I 이 K_{th} 보다 작거나 같을 때, $\dot{a} = 0$.

튜브와 경판 사이의 둥근 테 영역에서 튜브의 외부표면으로부터 균열 성장을 계산하기 위하여 2의 인자가 상기 균열 성장률에 적용되어야 한다.

A 3240 피로 및 SCC의 조합에 의한 결점성장

결점이 피로 및 SCC 성장 두 가지 모두에 영향을 받는 쉬운 운전하중과 재료 및 환경 조건에 있는 경우, 위에서 서술한 절차에 따라 계산된 피로 및 SCC에 의한 결점 크기의 증분을 더하여 최종 결점 크기 a_f 및 ℓ_f 를 구한다. 주기적인 하중은 개략적 순서에 따라 고려되어야 한다.

A 3300 결점 평가

허용가능한 평가기간 끝에서의 결점크기는 표 3-1에 규정되어 있다. 이 표에 명시된 허용가능한 결점크기는 적용된 응력 수준과는 무관하다.

$$\dot{a} = \exp \left[-\frac{Q_g}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \alpha (K_I - K_{th})^\beta \quad (4)$$

where

\dot{a} = crack growth rate at temperature T in m/s
 Q_g = thermal activation energy for crack growth
 = 130 kJ/mole
 R = universal gas constant
 = 8.314×10^{-3} kJ/mole K
 T = absolute operating temperature at location of crack, K

T_{ref} = absolute reference temperature used to normalize data
 = 598.15 K

α = crack growth rate coefficient
 = 2.67×10^{-12} at 325°C for \dot{a} in units of m/s and K_I in units of MPa \sqrt{m}

K_I = crack tip stress intensity factor, MPa \sqrt{m}

K_{th} = crack tip stress intensity factor threshold for SCC
 = 9 MPa \sqrt{m}

β = exponent
 = 1.16

When K_I is less than or equal to K_{th} , $\dot{a} = 0$.

For calculation of crack growth from the outside surface of the tube, in the annulus region between the tube and the head, a factor of two shall be applied to the crack growth rate above.

A-3240 Flaw Growth Due to a Combination of Fatigue and SCC

When the service loading and the material and environmental conditions are such that the flaw is subjected to both fatigue and SCC growth, the final flaw size a_f and ℓ_f are obtained by adding the increments in flaw size due to fatigue and SCC computed in accordance with the procedures described above. The cyclic loads shall be considered in approximately chronological order.

A-3300 FLAW EVALUATION

The allowable end-of-evaluation period flaw sizes are provided in Table 3-1. The allowable flaw sizes specified in these tables are independent of the applied stress level.