

비파괴검사의 신뢰성

박 대 호
한국전력기술(주)

1985년 12월 17일 접수

Reliability of Nondestructive Testing

Dae Ho Park

1. 요 약

이상적인 검사는 합부판정 기준보다 큰 결함을 100% 검출, 불합격시키고 그보다 작은 결함은 100% 합격시킬 수 있으나 현실적으로 이는 불가능 하고 검사의 본질적인 불확실성으로 인해 때로는 합격되어야 할 결함이 불합격으로 처리되거나 (TYPE 1 ERROR라 칭함) 불합격되어야 할 결함이 합격으로 처리되기도 한다. (TYPE 2 ERROR)

TYPE 1 ERROR 및 TYPE 2 ERROR를 동시에 줄이기 위해서는 검사의 불확실성을 제거하여야 하며 주어진 합부판정 기준과 검사불확실성하에서 검사를 둘러싼 총경비를 최소화시키기 위하여는 TYPE 1 ERROR와 TYPE 2 ERROR의 확률 및 그로 인한 예상 경비를 관련시켜야 한다.

2. IRP (Imperfection Rejection Probability, 검사불합격 확률)

검사결과 한 결함이 불합격으로 처리될 확률을 IRP라 한다. 이는 그 검사에 적용된 합부판정기준, 결함의 크기 및 고유의 검사불확실성에

의해 결정된다고 볼수 있으므로 IRP, 즉 $P(R|a, s)$ 는 다음 식으로 나타내어 질수 있다. (통계학적으로 정규분포를 이룬다고 가정)

$$P(R|a, S) = \frac{1}{\delta \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^a \exp\{-\frac{(x-S)^2}{2\delta^2}\} dx$$

* δ : 검사 불확실성 (그림 1에서 Transition Region의 폭과 관련, 표준 편차)

* S : 합부 판정기준 즉, 검사결과 합격될 확률이 50%인 결함의 크기.

* a : 결함의 크기

그림 1에서 실제 Eddy Current Test의 data로 분석한 것 (Fatigue Flaw Growth and NDI Evaluation for Preventing Through Cracks in Spacecraft Tankage Structures, NASA CR-1285600에서 인용) 이 Measured Eddy Current Inspection 곡선이며 이보다 좀 더 검사불확실성이 줄어든 것이 Method A의 곡선이다.

2x GAIN의 곡선은 Acceptance Criteria를 반으로 낮춘 경우로서 실제 관심이 되는 크기 b보다 작은 결함도 일부가 100% 불합격됨을 보

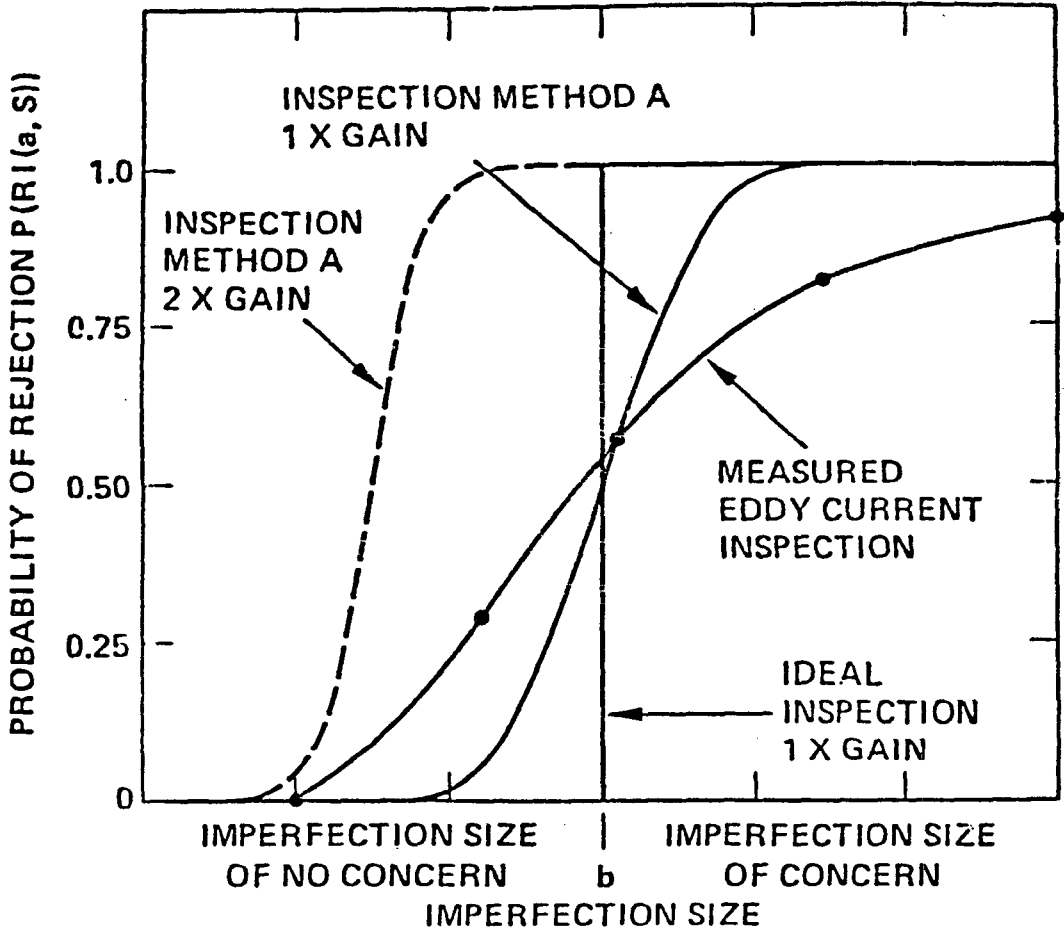


그림 1. IRP

이고 있다. 즉, 검사에서 합부판정 기준을 낮추면 불합격 되어야 할 결함의 검출은 거의 완벽해지나 합격되어야 할 결함이 불합격되는 확률이 크게 증가하므로 검사의 신뢰성을 높이는 방법이 될 수 없을 뿐 아니라 검사에 관련된 총경비를 증가 시킨다. 따라서 검사 신뢰도의 향상은 검사의 불확실성을 제거하여 곡선의 Transition Region을 폭을 좁힘으로서만 가능하다.

3. 검사 불확실성

일반적으로 검사가 지니고 있는 본질적인 불확실성은 결함의 형상, 위치, 방향에 따른 Res-

ponse의 차이, 교정용 인공결함과 실제 결함과의 Response 차이, Noise 검사기기의 정밀도 및 검사원에 의한 오차등으로 크게 나누어 질 수 있다.

가. 결함의 형상, 위치, 방향

같은 크기의 결함이라도 결함의 형상, 재질, 위치 및 방향에 따라 Response 또는 결함지시 모양이 달라지므로 실제 결함을 정확히 측정할 수 없다.

나. 교정용 인공결함

교정용 인공결함(RT등은 제외)을 실제 결함의 종류별로 가능한 한 가깝도록 제작해야 하나 이는 검사의 속도, 제작비용 등

의 문제를 수반하므로 단일한 교정 결함을 만드는 것이 일반적이다.

다. Noise

재질내의 micro-, macro structure에 의한 잡음, 기타 전기적 신호, Steam Generator Tube의 ECT에서 Tube Support로 인한 신호 등 결함의 검출을 방해하는 Noise로부터의 영향을 완전히 제거하는 것은 불가능하다.

라. 검사기기의 정밀도

검사기기 설계에 따라 본질적으로 포함되는 불확실 요인외에도 실제 검사물에 검사기기를 적절히 적용시키는 데의 한계에 기인한다.

마. 검사원에 의한 오차

수동검사는 물론 자동검사에 있어서도 같은 검사절차 및 기기에 의한 검사라도 동일한 결과를 재현하는 것에는 한계가 있다. 특히 결함의 평가 및 해석에서 종종 심각한 이견이 대두되는 것을 보면 검사자에 의한 오차는 무시할 수 없는 정도의 것이라 할수 있다.

4. TYPE 1 ERROR

한제품의 검사후 그 제품에 잔존할 불합격 결함의수 (PN_D(S)) 는

$$PN_D(S) = V_u \int_b^\infty pn(\langle a, S \rangle | \bar{R}) da$$

로 나타내어 진다.

단, V_u : 제품의 체적

$$pn(\langle a, S \rangle | R) = \{1 - P(R | \langle a, S \rangle)\} \times \{pn\langle a \rangle\} \{1 - F_R \langle S \rangle\}^{-1}$$

: 검사후 결함 잔존 분포

pn(a) = A · e^{-a/α} : 검사전 결함존재 분포로서

Δa가 0으로 수렴할 때 a와 a+Δa사이의 크기를 가진 결함의 단위 체적당 갯수가 pn(a) · Δa이다. (그림 2 참조)

F_RS : 검사에게 불합격되는 제품의 비율

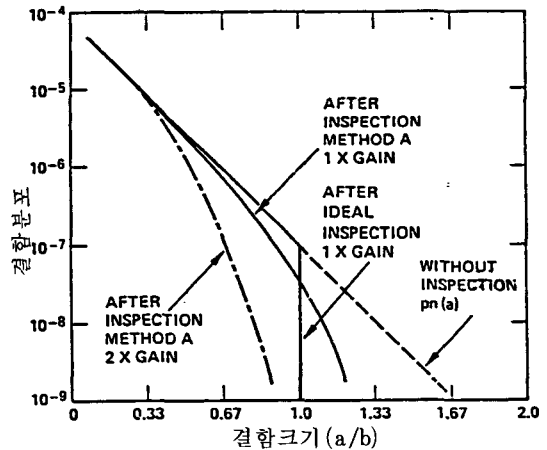


그림 3. 검사후 불량품률

한 제품이 검사후 합격되었으나 불합격 결함을 포함하고 있을 확률(P_D(S)) 은 그제품이 b보다 큰 결함을 가지지 않는 확률을 1에서 뺀 것과 같다. 즉,

$$P_D(S) = 1 - e^{-PN_D(S)} = 1 - \exp\left[-V_u \int_b^\infty \{1 - P(R | \langle a, S \rangle)\} \chi\{pn\langle a \rangle\} \cdot \{1 - F_R \langle S \rangle\}^{-1} da\right]$$

가 된다.

검사를 거치지 않은 제품이 불합격 결함을 가진 확률(P_{D0}) 은

$$P_{D0} = 1 - e^{-PN_{D0}}$$

로 나타내어지고 여기서

$$PN_{D0} = V_u \int_b^\infty pn(a) da \text{ 이다.}$$

(검사전 제품당 불합격 결함의 수)

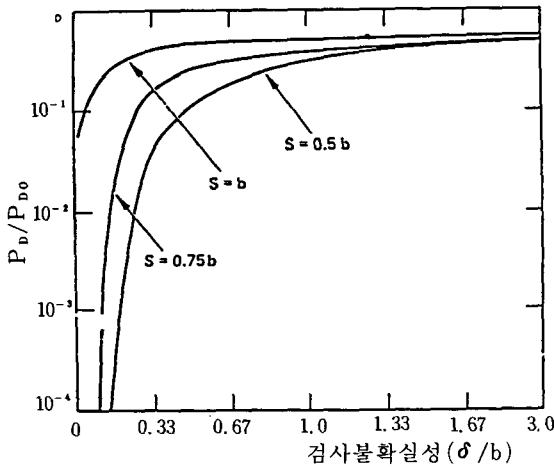


그림 3. 검사후 불량품율

그림 3에서 보는 바와같이 불량격 결함의 합격률은 검사불확실성의 값이 떨어짐에 따라 급격히 떨어진다. 합부 판정기준(S)을 낮추어도 동일한 결과를 얻지만 대신 합격될 결함을 불량격시키는 확률이 높아진다는 것이 다르다.

5. TYPE 2 ERROR

불합격될 결함을 가지고 있지 않은 제품이 불합격될 확률(P_{SR})은

$$P_{SR} = (1 - e^{-PN_{SR}(s)})(1 - P_{D0})$$

로 나타내어진다.

단, $PN_{SR}(S) = V_U \int_0^b pn(a, S, R) da$: b보다 작은

결함중 불합격될 결함의 수

$$Pn(a, S, R) = P(R | \langle a, S \rangle) \cdot Pn(a)$$

: 불합격의 원인이 되는 결함의 분포

$$\text{즉, } P_{SR} = [1 - \exp\{-V_U \int_0^b P(R | \langle a, S \rangle) \cdot$$

$$Pn(a) da\}] (1 - P_{D0})$$

이다.

또, 한제품이 불합격될 확률($P_R(S)$)은

$$P_R(S) = 1 - e^{-PN_R(s)}$$

$$\text{단, } PN_R(S) = V_U \int_0^\infty Pn(a, S, R) da$$

6. Total Cost

검사를 둘러싼 총경비는 여러요인으로 구성된다. 즉 불량격품 제조비용, 검사비용, 불량격품에 섞인 합격품 가격, 합격품속에 섞인 불량격품에 의해 발생된 사고에 의한 비용등으로 이들의 총화가 최소인 방법을 택하여야 할 것이다.

합부 판정 기준(S)을 선정하는데에 있어서는 위의 네항목을 모두 고려하여야 할 것이며 이를 식으로 표현하면

$$C = (C_M + C_I) (1 - P_R(S))^{-1} + (C_D P_D(S))$$

C : 제품당 원가

C_M : 제품당 제조비

C_I : 제품당 검사비

C_D : 불량적인 제품이 판매됨으로 인해 발생하는 After Service 비용, 손해배상 비용등의 손실비용

그림 4에 $C_M + C_I = 1,000$ 원, $C_D = 10,000$ 인 경우의 제품당원가 δ 와 S의 관계를 예시하였다. 일례로 $\delta = 0.01b$ 인 경우에는 $S = 0.9b$ 인 경우가 최저원가임을 알 수 있다. 또 δ 의 값이 커질수록 제품당 원가가 상승하고 있다.

증기발생기의 Tube 가동중 검사의 경우에는 이와는 조금 다른식이 유도되는데,

$$C = C_I + P_s(R) C_{SR} + P_D(S) \cdot C_D$$

C_{SR} : 합격될 Tube가 불량격되어 Plugging 또는 기타 조치로 인해 발생하는 손실비용 (증기발생기의 교체시기가 짧아지는 것 등)

C_D : 불량격될 Tube가 합격되어 냉각재 유실

사고가 발생한 경우의 손실비용이 된다.

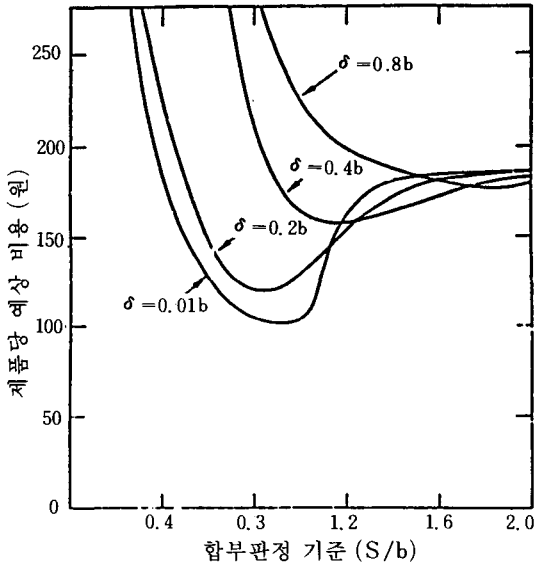


그림 4. 제품원가

7. 결 론

검사의 신뢰성을 높이기 위해서는 합부 판정 기준을 적절히 세우는 것 보다도 검사불확실성을 줄여 나가는 것이 중요하다. 검사를 둘러싼 총 경비를 줄이기 위해서는 적절한 합부 판정기준이 설립이 중요하며 이는 IRP의 함수로서 결정되고 검사불확실성이 감소할수록 총경비는 감소됨을 알 수 있다.

8. 참고문헌

- Inspection Uncertainty, Duane P. Johnson, EPRI .
- Inspection Reliability, Metal Handbook Vol. 11
- Evaluation of the Eddy Current Method of Inspections Steam Generator Tubing, Jolt, Flora and S. D. Brown, Battelle Columbus Laboratories.