

ASME NQA-1 "4:1 Rule"의 실무 이행 가이드라인

원자력 품질보증 기준과 국제 교정 표준(ISO/IEC 17025)의 정합성 확보

주진홍 선임연구원
(한국원자력안전재단 성능검증관리센터)



목차

I. 역사와 발전

II. 실무 이행 가이드 라인

III. Case Study

4:1 Rule의 개요 및 배경

NQA-1 Requirement 12, Section 302

교정용 표준기는 측정 및 시험장비(M&TE)보다 최소 **4배 이상의 정확도**를 가져야 한다는 규정입니다.

- ✓ 교정용 표준기 자체의 오차가 측정 및 시험장비 허용 오차의 1/4을 넘지 않도록 보장
- ✓ 측정 신뢰성 향상 및 의사결정 위험 최소화
- ✓ 4:1 비율 유지가 불가능할 경우 기술적 정당화 필요



Part I. 역사와 발전

1950년대 미 해군에서 시작된 통계적 신뢰성의 진화

4:1 Rule의 역사적 기원

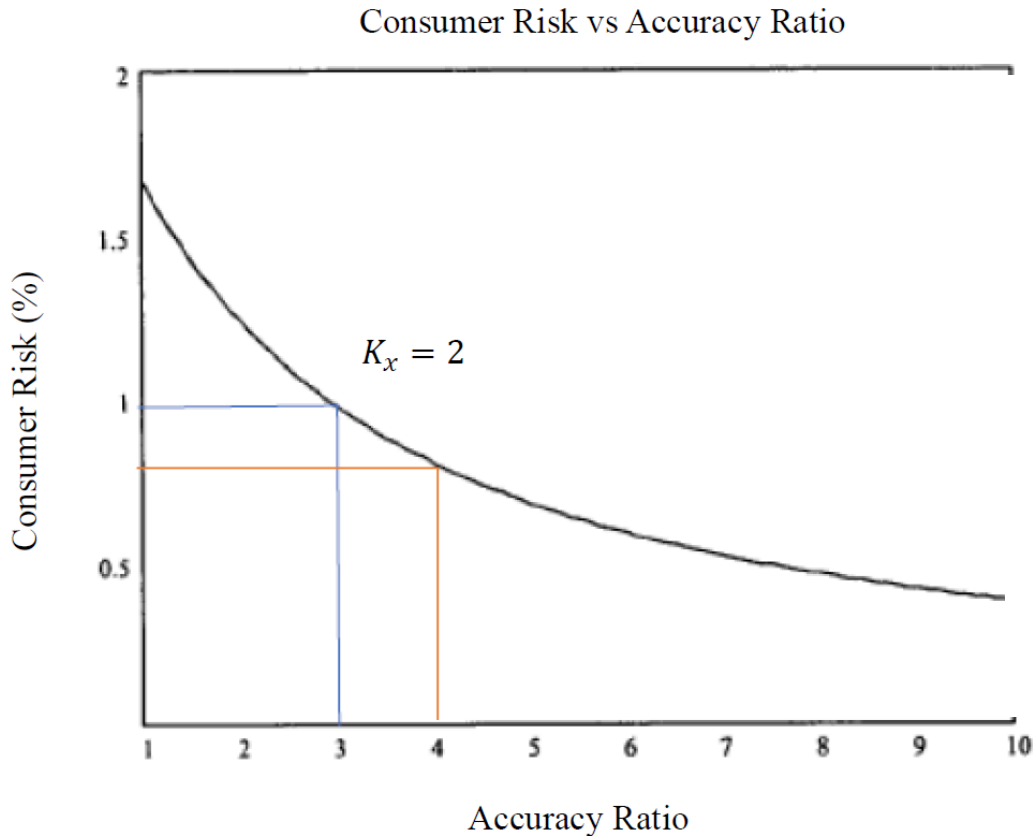


1955년, 미 해군 유도미사일 프로그램

Jerry L. Hayes는 공장 시험 합격품이 검수 과정에서 불합격하는 문제를 해결하기 위해 '소비자 위험(Consumer Risk)' 분석을 도입

- ✓ 초기 제안: 3:1 비율 (소비자 위험 약 1% 기준)
- ✓ 군수 표준 확정: 4:1 비율 (안전 여유를 고려한 0.8% PFA)
- ✓ 목적: 불합격품을 합격으로 판정할 확률(PFA) 최소화

통계적 기초: 소비자 위험 vs 정확도 비율



$$\text{Consumer Risk} = \frac{1}{\pi} \int_{k_x}^{\infty} \int_{-r(k_x+t)}^{r(k_x-t)} e^{-\frac{(t^2+s^2)}{2}} ds dt$$

Where:

- $r = \frac{\sigma_x}{\sigma_e} = \frac{\sigma_x}{u_e}$: accuracy ratio
- $\text{TUR} = \frac{\text{Upper-Lower}}{2U_{95}} = \frac{\text{Upper-Lower}}{2k_e u_e} = \frac{2k_x \sigma_x}{2k_e u_e} = \frac{k_x \sigma_x}{k_e u_e}$: Test Uncertainty Ratio
- σ_x : Standard deviation of the product distribution
- σ_e : Standard deviation of the measurement errors
- u_e : Standard uncertainty of the measurement errors
- $S \sim N(0, 1)$: Distribution of the measurement errors, where $S = \frac{Y-X}{\sigma_e}$
- $T \sim N(0, 1)$ the product distribution, where $T = \frac{X}{\sigma_x}$

미국 교정 표준의 발전 과정

문서명	년도	핵심 내용
MIL-STD 45662A	1988	교정용 표준기 불확도가 허용 오차의 25% 이내일 것 명시
ANSI/NCSL Z540.1	1994	ISO/IEC Guide 25 통합 및 4:1 Rule 유지
ANSI/NCSL Z540.3	2006	TUR(Test Uncertainty Ratio) 개념 도입 및 $PFA \leq 2\%$ 관리
ASME NQA-1	2008	4:1 Rule을 명문화하여 원자력 품질보증에 적용

Part II. 실무 이행 가이드라인

ISO/IEC 17025 환경에서의 4:1 Rule 적용 전략

ISO/IEC 17025와 적합성



ISO/IEC 17025 연계

국제 표준은 적합성 평가를 명시적으로 요구하지 않으나, 원자력 산업에서는 ASME 요건에 따라 필수적으로 수행 필요



PFA ≤ 2% 관리

단순한 4:1 비율을 넘어, 실제 오판정 위험을 2% 이내로 관리하는 것이 현대적 해석의 핵심

보호대역(Guard Band) 적용 방법론



RSS 방법

Root-Sum-Square 방식을 통한
채택 한계 계산

$$A.L. = \sqrt{(T.L.)^2 - U^2}$$



Dobbert 방법

TUR이 1~15 사이일 때 사용하는
채택 한계 계산

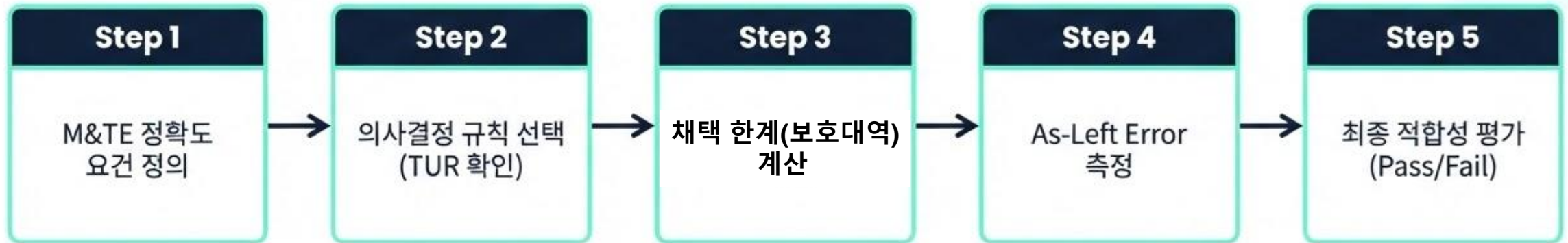
$$A.L. = T.L. - U \times (1.04 - e^{(0.38 \log(TUR) - 0.54)})$$



Zero 가드밴드

TUR ≥ 4인 경우 추가 보호대역 없이
허용 한계 그대로 적용

실무 이행 5단계 프로세스



실무 이행 5단계 프로세스

Step 1. M&TE 정확도 요구사항 정의

1. M&TE에 요구되는 정확도 요건을 확인
2. 다음 우선순위에 따라 허용 한계(Tolerance Limit) 선택
 - 제조자 규격 한계(Specification Limit)
 - 규제 또는 규제적 표준
 - IEC60529에 따른 정확도(단, IEC60529에 따른 정확도가 요구되는 정확도보다 작거나 같은 경우에만)
 - ISO/IEC 10012(자격 인정된 자가 규정된 절차에 따라 문서화)에 따라 요구되는 정확도보다 강화된 규격 한계를 정의

실무 이행 5단계 프로세스

Step 2. 의사 결정 규칙 선택

1. TUR 계산이 가능한 경우
 - 우선순위 1(PFA 2% 의사 결정 규칙) $PFA \leq 2\%$ 조건을 만족하는 보호대역을 사용하여 합부판정
 - 우선순위 2(TUR 4:1 의사 결정 규칙) $TUR \geq 4$ 조건을 만족하는 합부판정(보호대역 = 0)
2. TUR 계산이 불가능한 경우
 - 보호대역 = U(교정 과정의 확장불확도)를 사용하여 합부판정

실무 이행 5단계 프로세스

Step 3. 채택 한계(Acceptance Limit) 산출

1. TUR 계산이 가능한 경우(PFA ≤ 2% 의사결정 규칙)

1) PFA 계산이 가능한 경우(Practical)

• Dobbert 방법(단, $1 < TUR < 15$ 인 경우에 적용)

$$Acceptance\ Limit = Tolerance\ Limit - U \times (1.04 - e^{(0.38 \log(TUR) - 0.54)})$$

(U: 교정 관련 95% 확장불확도)

단, $TUR \geq 4$ 인 경우, $Acceptance\ Limit = Tolerance\ Limit$ 를 적용

(이 경우, Dobbert 방법을 적용하면 $Acceptance\ Limit > Tolerance\ Limit$ 가 됨.)

• Root-Sum-Square 방법

$$Acceptance\ Limit = \sqrt{(Tolerance\ Limit)^2 - U^2}$$

(U: 교정 관련 95% 확장불확도)

2) PFA 계산이 어려운 경우(NOT Practical)(TUR 4:1 의사결정 규칙)

$$Acceptance\ Limit = Tolerance\ Limit$$

실무 이행 5단계 프로세스

Step 3. 채택 한계(Acceptance Limit) 산출

2. TUR 계산이 불가능한 경우

- 측정값 > 허용 한계(Tolerance Limit) 조건을 만족해야 하는 경우(U: 교정 과정의 확장불확도)

$$Acceptance\ Limit = Tolerance\ Limit + U$$

- 측정값 < 허용 한계(Tolerance Limit) 조건을 만족해야 하는 경우(U: 교정 과정의 확장불확도)

$$Acceptance\ Limit = Tolerance\ Limit - U$$

Step 4. As-Left Error 산출

- $|As-Left\ Error| = |측정값 - 기준값|$

Step 5. 교정 적합성 평가

1. TUR 계산이 가능한 경우: $|As-Left\ Error| < |채택\ 한계| \rightarrow$ 합격
2. TUR 계산이 불가능한 경우,
 - 측정값 > 허용 한계 조건인 경우, 측정값 > 채택 한계 \rightarrow 합격
 - 측정값 < 허용 한계 조건인 경우, 측정값 < 채택 한계 \rightarrow 합격

Part III. Case Study

EMC 시험용 신호발생기(Signal Generator) 적합성 평가

적합성 평가 대상

전자기파 시험(EMC Test)용 신호 발생기(Signal Generator)

1. 원자력 관련 시험 기술기준
 - MIL-STD-461G / IEC 61000 일부(U.S NRC's Reg. Guide 1.180, Rev.2)
2. 적합성 평가 관련 기술기준
 - 없음.

Cf. EMI test receiver는 CISPR 16-1-1의 규격에 따라 제조

1단계 M&TE 정확도 요구사항 정의

M&TE에 요구되는 정확도 요건을 확인

- 적용해야 할 필수적인 기술기준 요건이 없으므로 제조사 규격 한계(Specification Limit)를 허용 한계(Tolerance Limit)로 선택

- Rohde & Schwarz SMB100B

< 규격 한계(Specification Limits) >

- Level > -90 dBm
 - < 0.5 dB (200 kHz < frequency ≤ 3 GHz)
 - < 0.7 dB (frequency > 3 GHz)
- Level ≤ -90 dBm
 - < 1.2 dB (200 kHz < frequency ≤ 10 MHz)
 - < 0.8 dB (10 MHz < frequency ≤ 3 GHz)
- < 1.1 dB (frequency > 3 GHz)

Level performance		
Specified level range, peak envelope power (PEP)		
R&S®SMBB-B101/-B103/-B106	standard	
	200 kHz < f ≤ 1 MHz	-110 dBm to +13 dBm
	1 MHz < f ≤ 10 MHz	-110 dBm to +18 dBm
	10 MHz < f ≤ 6 GHz	-127 dBm to +18 dBm
	with R&S®SMBB-K31 option	
	200 kHz < f ≤ 1 MHz	-110 dBm to +13 dBm
	1 MHz < f ≤ 10 MHz	-110 dBm to +21 dBm
	10 MHz < f ≤ 4 GHz	-127 dBm to +21 dBm
	4 GHz < f ≤ 6 GHz	-127 dBm to +20 dBm
with R&S®SMBB-B32 and R&S®SMBB-K31 option		
200 kHz < f ≤ 10 MHz	-110 dBm to +21 dBm	
10 MHz < f ≤ 6 GHz	-127 dBm to +26 dBm	
Level accuracy	level setting characteristic: auto, temperature range +10 °C to +33 °C	
R&S®SMBB-B101/-B103/-B106	level > -90 dBm	
	200 kHz < f ≤ 3 GHz	< 0.5 dB
	f > 3 GHz	< 0.7 dB
	level ≤ -90 dBm	
	200 kHz < f ≤ 10 MHz	< 1.2 dB
	10 MHz < f ≤ 3 GHz	< 0.8 dB
f > 3 GHz	< 1.1 dB	
Additional level error	ALC state "Off (Table)"	< 0.5 dB
	Pulse modulation	< 0.5 dB

2단계 의사 결정 규칙 선택

TUR 계산 가능 여부를 확인

1. 모든 구간에서 TUR 계산이 가능(< 규격 한계)
2. PFA 2%를 만족하는 보호대역으로 채택 한계를 구하는 의사 결정 규칙을 선택(합부 판정 규칙)

3단계 채택 한계 산출

TUR 계산이 가능하고 PFA 계산이 Practical(정규 분포 가정 가능)

SICT 교정결과 CALIBRATION RESULTS

심적서번호 : 230516AP04 교 정 일 자 : 2023. 05. 17
모 델 : SMB100B 차기교정예정일자 : 2024. 05. 17

1. RF Level Accuracy

Frequency	Amplitude	Measured Value	Measurement Uncertainty
8 kHz	5 dBm	4.91 dBm	0.25 dB
9 kHz	5 dBm	4.84 dBm	0.25 dB
100 kHz	5 dBm	4.97 dBm	0.25 dB
0.01 GHz	5 dBm	4.90 dBm	0.25 dB
0.03 GHz	5 dBm	4.99 dBm	0.25 dB
0.05 GHz	5 dBm	5.03 dBm	0.25 dB
0.1 GHz	5 dBm	5.02 dBm	0.25 dB
0.3 GHz	5 dBm	5.01 dBm	0.25 dB
0.5 GHz	5 dBm	5.02 dBm	0.25 dB
1.0 GHz	5 dBm	5.11 dBm	0.25 dB
1.2 GHz	5 dBm	5.13 dBm	0.25 dB
1.4 GHz	5 dBm	5.12 dBm	0.25 dB
1.6 GHz	5 dBm	5.14 dBm	0.25 dB

3단계 채택 한계 산출

주파수별 시험불확도비(TUR) 확인 및 채택 한계 산출

- $1 < TUR < 4$ 이므로 Dobbert 방법을 사용하여 채택 한계(Acceptance Limit) 산출

주파수 (Frequency)	진폭 (Amplitude, dBm)	허용 한계 (Tolerance Limit, dB)	확장불확도 (U,dB)	시험 불확도비 (TUR)	비고	채택 한계 (Acceptance Limit, dB)
0.03 GHz	5	0.5	0.25	2.0	< 4	0.43
중략						
3.0 GHz	5	0.5	0.26	1.9	< 4	0.42
중략						
3.8 GHz	5	0.7	0.26	2.7	< 4	0.65

4,5단계 As-Left Error 산출 및 교정 적합성 평가

주파수 (Frequency)	진폭 (Amplitude, dBm)	규격 한계 (Specification Limit, dB)	측정값 (Measured Value, dBm)	As-Left Error (dBm)	확장불확도 (U, dB)	시험 불확도비 (TUR)	채택 한계 (Acceptance Limit, dB)	적합성 평가 (Pass/Fail)
0.03 GHz	5	0.5	4.99	0.01	0.25	2.0	0.43	Pass
중략								
3.0 GHz	5	0.5	5.11	0.11	0.26	1.9	0.42	Pass
중략								
3.8 GHz	5	0.7	5.09	0.09	0.26	2.7	0.65	Pass

Q & A

ASME NQA-1 4:1 Rule 이행에 대해 궁금하신 점이 있으신가요?

✉ jjh@kofons.or.kr

🌐 www.kofons.or.kr