

1 GHz 대역 임펄스의 스펙트럼 진폭 불확도 평가

Uncertainty Analysis of 1 GHz Band Impulse Spectrum Amplitude

이동준*** · 이주광* · 권재용* · 강태원*

Dong-Joon Lee*** · Joo-Gwang Lee* · Jae-Yong Kwon* · Tae-Weon Kang*

요 약

본 논문에서는 임펄스 발생기로부터 계측 시스템으로 전달되는 펄스 신호의 주파수 성분을 매우 정밀하게 측정하고 관련 불확도를 평가하는 시스템과 방법을 다루었다. 임펄스 신호의 스펙트럼 진폭 불확도를 결정짓는 복잡한 요소들과 그 해석적 분석 방법 및 실측을 통한 평가 결과를 제시하였다. 측정 시스템의 확장 불확도는 0.015이고, 이는 국내 최고 수준이며 세계적 교정기관의 결과와도 대등한 수준이다.

Abstract

This paper presents a methodology to accurately evaluate the spectral components of impulse signals which are delivered from an impulse generator through the measurement system. The complicated terms for uncertainty measurement of impulse spectrum amplitude and their analysis methods and experimental results are discussed. The expanded uncertainty of the impulse spectrum measurement is 0.015, which is believed to be the best domestic measurement capability and comparable to those of world class.

Key words : Impulse Spectrum Analysis, Sampling Oscilloscope, Uncertainty, EMI/EMC Calibration

I. 서 론

초고속 디지털 이동통신의 눈부신 발전에 따라 전자신호는 디지털 펄스화 하는 추세이며, 이에 따라 펄스 파형을 발생, 측정하는 계측기기들의 종류도 다양화되고 측정 속도 및 기능도 향상되고 있다. 샘플링 오실로스코프, 초고속 펄스발생기, 디지털 통신용 측정기 등의 고성능 계측기기들은 대부분 수입에 의존하고 있는데, 이러한 기기들의 성능을 정확히 평가하는 것은 국내 계측기기 산업의 발전뿐만 아니라 이를 이용하는 산업체에게도 매우 중요한 문제이다.

펄스 계측기 중 임펄스 발생기(impulse generator)

는 전자기장의 세기 측정기, 스펙트럼 분석기, EMI 수신기의 광대역 잡음 응답 특성을 교정하는데 사용되며, 이들 기기의 정확한 교정을 위해서는 임펄스 발생기의 광대역 특성인 Impulse Spectrum Amplitude (ISA)를 정확히 평가하여야 한다^[1].

이를 위하여 미국의 NIST(National Institute of Standards and Technology)를 위시한 독일 PTB(Physikalisch-Technische Bundesanstalt), 스위스 METAS(Das Bundesamt für Metrologie) 등의 해외 선진 표준기관들은 각각 0.1 dB, 0.2 dB, 0.25 dB 수준의 ISA 불확도로 교정 능력을 확보하고 있다^[2]. 국내 수요에 대응하기 위해서는 2002년부터 한국표준과학연구원서 0.7 dB 수준의 ISA 교정 서비스를 제공하고 있다.

*한국표준과학연구원 전자파센터(Korea Research Institute of Standards and Science)

**과학기술연합대학원대학교 측정과학부(University of Science and Technology)

· Manuscript received September 27, 2012 ; Revised October 25, 2012 ; Accepted November 9, 2012. (ID No. 20120927-107)

· Corresponding Author : Dong-Joon Lee (e-mail : dongjoonlee@kriss.re.kr)

본 논문에서는 세계 최고 수준의 교정 능력을 보유한 NIST 방법^[3]을 한국표준과학연구원 ISA 교정 시스템에 알맞게 적용한 불확도 개선 방법 및 결과를 다룬다. 개선된 ISA 불확도는 1.5 % (0.13 dB) 이내이며, 이를 산출하기 위한 각각의 불확도 요인 및 평가 기법을 제시한다.

II. 불확도 요인 분석

임펄스 파형의 스펙트럼 진폭 V_k 와 그 합성표준 불확도 u_{V_k} 를 평가하기 위한 분석도는 그림 1과 같다. u_{V_k} 는 반복 측정에 의한 통계적인 A형 불확도와 통계적 특성 이외의 시스템 고유의 특성에 기인한 B형 불확도를 종합적으로 포함한 합성표준불확도이다. 그림 1의 각 관련 세부 불확도 및 파라미터들의 정의는 부록에 표로 정리되어 있다.

합성표준불확도는 다음과 같이 각 불확도 요인 x_i 의 불확도 $u(x_i)$ 와 그 감도 계수 V_k/x_i 와의 곱과 합 RMS 향으로 표현되며^[4], 그림 1(b)의 최상위 5개 불확도 요소에 의해 식 (1)과 같이 전개된다.

$$u_{V_k} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{V_k}{x_i}\right)^2 u^2(x_i)}$$

$$= V_k \sqrt{\left(\frac{u_{V_{m,k}}}{V_{m,k}}\right)^2 + \left(\frac{u_{H_{sys,k}}}{H_{sys,k}}\right)^2 + \left(\frac{u_{J_k}}{J_k}\right)^2 + \left(\frac{u_{T_k}}{T_k}\right)^2 + \left(\frac{u_{\Delta f}}{\Delta f}\right)^2}$$

(1)

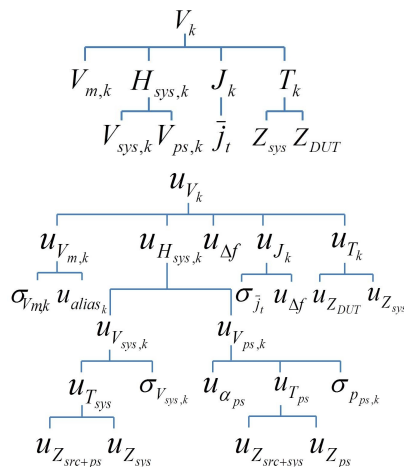
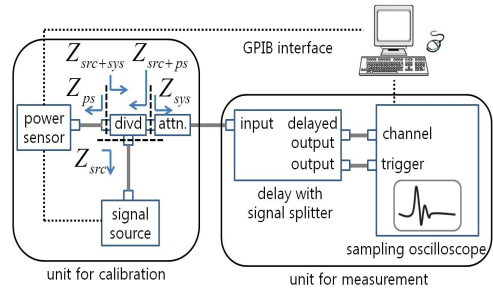
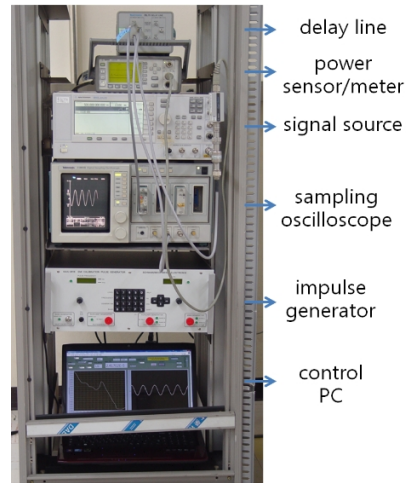


그림 1. V_k 와 u_{V_k} 의 구성도
Fig. 1. Hierarchy diagrams for V_k and u_{V_k} .



(a) 측정시스템 교정을 위한 장비 배치도
(a) Diagram of instrumentation setup for measurement system calibration



(b) 실제 측정 시스템
(b) Implemented measurement system

그림 2. 임펄스 스펙트럼 진폭 불확도 평가 시스템
Fig. 2. ISA uncertainty analysis system.

스펙트럼 진폭 V_k 와 그 합성표준불확도를 구성하는 $u_{V_{m,k}}$, $u_{H_{sys,k}}$, $u_{\Delta f}$, u_{J_k} , u_{T_k} 는 그림 1의 구성도와 같이 또 다른 복잡한 향으로 연계되어 구성되어 있으므로 다음의 세부 절에서 자세히 다룬다.

2-1 임펄스 스펙트럼 진폭 불확도 평가시스템

실측하고자 하는 임펄스 파형의 정확한 스펙트럼 진폭 평가에 있어서 가장 중요한 부분은 측정 시스템의 교정을 위한 시스템 분석이다. 그 평가 시스템은 그림 2에 나타나 있다.

측정하고자 하는 임펄스의 스펙트럼 진폭 교정을 위하여 그 주파수 대역을 발생시킬 수 있는(그림 2(a)의 좌측 부의) 신호원과 전력 분배기와 센서를

사용하여(그림 2(a)의 우측 부의) 시스템으로 전달되는 신호의 전력을 동시에 측정할 수 있도록 한다. 전력 센서에 전달되는 거의 같은 양의 신호는 신호 지연분배기를 통해 트리거 신호와 함께 오실로스코프로 전달되어 측정된다. 시스템의 전달 특성은 전력분배기 각 포트에서 바라보는 입출력 임피던스에 의해 크게 좌우된다. 이들 임피던스에 대한 정의와 불확도는 3절에서 다루기로 한다.

2-2 교정된 스펙트럼 진폭, V_k

임펄스 스펙트럼 진폭의 교정된 값 V_k 은 실측한 값 $V_{m,k}$ 로부터 구한다. $V_{m,k}$ 는 그림 2(a) 좌측의 시스템 평가용 신호부(신호원, 분배기, 전력 센서)를 실제 임펄스 발생기로 대체하였을 때 오실로스코프에서 측정된 전압으로부터 구해진다. 따라서 교정된 진폭 V_k 는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$V_k = \frac{V_{m,k}}{H_{sys,k} J_k T_k} \tag{2}$$

$V_{m,k}$ 는 임펄스 발생기의 출력 펄스가 시스템을 통하여 오실로스코프 상에서 계측되는 시간 영역의 파형을 푸리에 변환하여 구한다. 여기에 측정 시스템 고유의 calibration factor($H_{sys,k} J_k T_k$)⁻¹를 곱하여 교정된 스펙트럼 진폭 V_k 가 얻어진다.

그림 3은 임펄스 파형 발생기(SCHWARZBECK: IGU 2912)의 C/D 대역(30~1,000 MHz) 펄스 출력과 그 ISA를 그림 2의 시스템으로 측정한 결과이다 (ISA는 보편적으로 1 μ V/MHz와 상대적으로 비를 취한 dB μ V/MHz로 표현한다). 실험에서는 임펄스 발생기로부터 발생되는 50 dB μ V 출력에 대한 ISA를 평가하였다. 이를 오실로스코프로 계측 가능한 전압 레벨로 낮추기 위한 20 dB 감쇠기와 트리거 신호 발생을 위한 지연분배기를 거쳐서, 오실로스코프로 30회 측정된 파형을 중첩하여 도시하였다).

주파수 k 는 10 MHz에서부터 10 MHz 간격으로 1,000 MHz까지 100개의 배열 성분으로 해석하였다. H_{sys} 는 시스템의 전달 함수이며, 입력 신호에 대한 시스템으로 전달된 신호의 비로서, 다음과 같이 정의된다.

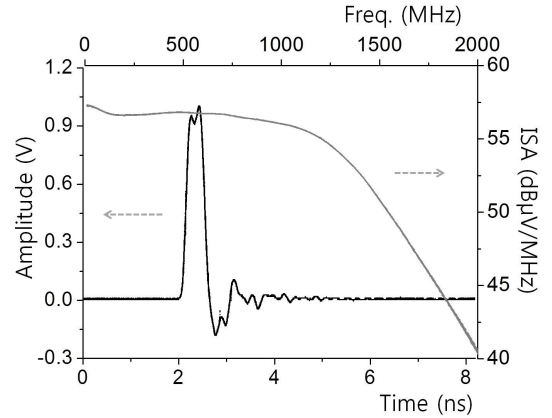


그림 3. 그림 2의 시스템을 통하여 측정된 임펄스 펄스 파형(좌측)과 그 스펙트럼 진폭(우측)
Fig. 3. Impulse trace(left) and its spectrum amplitude(right) through the measurement system in Fig. 2.

$$H_{sys,k} = \frac{V_{sys,k}}{V_{ps,k}} \tag{3-1}$$

T_k 는 평가하고자 하는 장치(DUT: 여기서는 임펄스 발생기)와 측정 시스템간의 임피던스 부정합 때문에 발생하는 전달계수로 다음과 같이 정의된다.

$$T_k = \frac{2Z_{sys,k}}{Z_{sys,k} + Z_{DUT,k}} \tag{3-2}$$

J_k 는 trigger jitter의 스펙트럼이며, 다음과 같이 정의된다.

$$J_k = e^{-2(\pi \bar{j}_t k \Delta f)^2} \tag{3-3}$$

여기서 Δf 는 주파수 간격인 10 MHz이며, \bar{j}_t (부록 참조)의 값은 일반적으로 10⁻²(s) 정도로 매우 작다^[3]. 일반적으로 J_k 와 (임피던스 정합이 잘 돼 있는 경우) T_k 는 모두 1에 가까운 값이므로 $H_{sys,k}$ 가 스펙트럼 진폭 교정에 가장 주요한 요소이다.

2-3 실측한 스펙트럼 진폭의 불확도, $u_{V_{m,k}}$

임펄스의 실측한 스펙트럼 진폭 $V_{m,k}$ 의 불확도는 잡음이나 커넥터의 반복도 등의 통계적 방식에 의한 A형 불확도 성분을 포함하며, M_1 회 측정(본 실험에서는 30회)에 대한 분산 $\sigma_{V_{m,k}}^2$ 와 aliasing에 의한 불확

도 $u_{alias,k}$ 의 향으로 식 (4)와 같이 표현된다.

$$u_{V_{m,k}} = \sqrt{\frac{\sigma^2 V_{m,k}}{M_1} + u_{alias,k}^2} \quad (4)$$

$u_{alias,k}$ 일반적으로 2×10^{-5} (V) 정도로 알려져 있다^[3].

2.4 시스템 전달 함수의 불확도, $u_{H_{sys,k}}$

시스템 전달 함수 $H_{sys,k}$ 의 불확도는 그림 1에서 알 수 있듯이 시스템 전체의 합성표준불확도 $u_{V,k}$ 에서 가장 복잡하고 비중 있는 항목이며, 식 (5)와 같이 표현된다.

$$u_{H_{sys,k}} = H_{sys,k} \sqrt{\left(\frac{u_{V_{sys,k}}}{V_{sys,k}}\right)^2 + \left(\frac{u_{V_{ps,k}}}{V_{ps,k}}\right)^2} \quad (5)$$

여기서 $V_{sys,k}$ 의 M_2 회 측정(본 실험에서는 10회)에 대한 불확도는

$$u_{V_{sys,k}} = \sqrt{\left(\frac{V_{sys,k}}{T_{sys,k}}\right)^2 u_{T_{sys,k}}^2 + \frac{\sigma^2 V_{sys,k}}{M_2}} \quad (5-1)$$

이며($\sigma_{V_{sys,k}}$ 는 부록 참조), 시스템의 전달계수 T_{sys} 와 그 불확도는 각각

$$T_{sys} = \frac{2Z_{src+ps}}{Z_{sys} + Z_{src+ps}} \quad (5-1-1)$$

와

$$u_{T_{sys}} = \frac{2}{(Z_{sys} + Z_{src+ps})^2} \sqrt{(Z_{sys}u_{Z_{src+ps}})^2 + (Z_{src+ps}u_{Z_{sys}})^2} \quad (5-1-2)$$

와 같이 각각의 관련 임피던스 Z_{sys} , Z_{src+ps} 와 그 불확도들의 향으로 표현된다.

한편, $V_{ps,k}$ 의 M_3 회 측정(본 실험에서는 10회)에 대한 불확도는

$$u_{V_{ps,k}} = \sqrt{V_{ps,k}^2 \left(\frac{u_{T_{ps}}^2}{T_{ps}^2} + \frac{1}{4} u_{\alpha_{ps}}^2\right) + \frac{\sigma^2 P_{ps,k}}{M_3} Z_{ps}} \quad (5-2)$$

이며($u_{T_{ps}}$, $\sigma_{P_{ps,k}}$ 는 부록 참조), 마찬가지로 시스템의

전달계수 T_{ps} 와 그 불확도는 각각

$$T_{ps} = \frac{2Z_{src+sys}}{Z_{ps} + Z_{src+sys}} \quad (5-2-1)$$

와

$$u_{T_{ps}} = \frac{2}{(Z_{ps} + Z_{src+sys})^2} \sqrt{(Z_{ps}u_{Z_{src+sys}})^2 + (Z_{src+sys}u_{Z_{ps}})^2} \quad (5-2-2)$$

와 같이 각각의 관련 임피던스 Z_{ps} , $Z_{src+sys}$ 와 그 불확도들의 향으로 표현된다.

2.5 주파수 간격의 불확도, $u_{\Delta f}$

주파수 간격 Δf 의 불확도는 시간 영역 신호의 지속시간에 영향을 받으며, 그 시간 영역 해석의 오차나 불확도는 sine-wave curve fitting 방법에 의해 결정될 수 있다. 이 때의 시간축 간격 불확도를 주파수로 환산한 불확도는 식 (6)과 같다.

$$u_{\Delta f} = \Delta f \sqrt{M_4} \sqrt{\left(\frac{u_{f_s}}{f_s}\right)^2 + \left(\frac{u_X}{X}\right)^2} \quad (6)$$

여기서 M_4 은 sine-wave curve fitting 방법에 사용된 주파수 개수이며, f_s 는 사용한 주파수 중 가장 높은 주파수이다. 또한 X 는 사용한 주파수 중 가장 낮은 주파수가 오실로스코프의 측정 시간창에서 포함된 주기의 개수이다. 본 실험에서는 시간축에서 4,096개의 측정 데이터로 파형을 구성하도록 하였고, 이를 주파수 변환시에는 $\Delta f = 10$ MHz의 간격으로 설정하였다. 이 같은 설정에서 일반적으로 $u_{\Delta f}$ 는 500 Hz 이하로 알려져 있으나^[3], 본 논문에서는 실측을 하지 않아 상대적으로 2 배 높은, 1,000 Hz의 불확도로 가정하고 해석하였다.

2.6 Trigger Jitter의 주파수 불확도, u_{J_k}

Trigger jitter J_k 의 불확도는 앞서 정의된 식 (3-3)으로부터 식 (7)과 같이 유도되며,

$$u_{J_k} = (2\pi k_j \Delta f)^2 \sqrt{\left(\frac{u_{\Delta f}}{\Delta f}\right)^2 + \left(\frac{u_{j_t}}{j_t}\right)^2} J_k \quad (7)$$

여기서 u_{j_t} 는 jitter의 불확도이며, 10^{-13} (s)의 매우 작

은 값이다^[3].

2.7 시스템 전달계수의 불확도, u_{T_k}

앞선 2-2절에서의 임펄스 발생기에서 시스템과의 전달계수 T_k 의 불확도는 식 (5-1-1, 2)와 유사하게 식 (8)과 같이 표현된다.

$$u_{T_k} = \frac{2}{(Z_{DUT} + Z_{sys})^2} \sqrt{(Z_{DUT}u_{Z_{sys}})^2 + (Z_{sys}u_{Z_{DUT}})^2} \quad (8)$$

III. 임피던스와 그 불확도 분석

앞선 불확도 분석에서 가장 근간이 되는 하위 레벨의 물리량은 임피던스와 그 불확도이다. 불확도 분석에 필요한 임피던스는, Z_{ps} , Z_{sys} , Z_{src} , Z_{src+ps} , $Z_{src+sys}$, Z_{DUT} 의 6가지이며 Z_{DUT} 는 평가하고자 하는 DUT에 해당하는 임펄스 발생기 출력단을 바라본 임피던스이며, 나머지 5개의 임피던스의 측정 부분은 그림 2(a)에 도시되어 있다.

임피던스는 벡터회로망 분석기를 통해 쉽게 측정될 수 있다. 다만 신호원을 바라보는 임피던스 Z_{src} , Z_{src+ps} , $Z_{src+sys}$ 는 사용된 벡터 회로망 분석기의 전력 레벨보다 20 dB 이하의 출력으로 신호원을 동작시킨 상태에서 측정하여야 한다. 이는 신호원이 전자파를 발진하는 활성 상태를 유지하면서도 측정 장비인 회로망 분석기의 오동작을 방지하기 위해서이다.

언급한 6개의 임피던스로 각각 투과계수 T_{ps} , T_{sys} , T_k 를 구할 수 있었다. 마찬가지로 이들 각각의 임피던스의 불확도는 3가지 투과계수의 불확도 $u_{T_{ps}}$, $u_{T_{sys}}$, u_{T_k} 에 사용된다. 임피던스 불확도의 평가에는 스위스 METAS에서 개발한 VNA Tools II 프로그램을 벡터 회로망 분석기(Agilent Technologies: E8361-C)와 연계하여 사용하였고, 신뢰수준이 약 68 %인 포함인자 $k_c=1$ 의 범위에서 B 형 불확도로 구하였다.

그림 4는 임피던스 중에서 가장 중요한, 시스템을 바라보는 Z_{sys} 의 크기와 그 불확도이다.

IV. 합성표준불확도 분석

실제 불확도 분석에서는 불확도 요인 x_i 에 대한

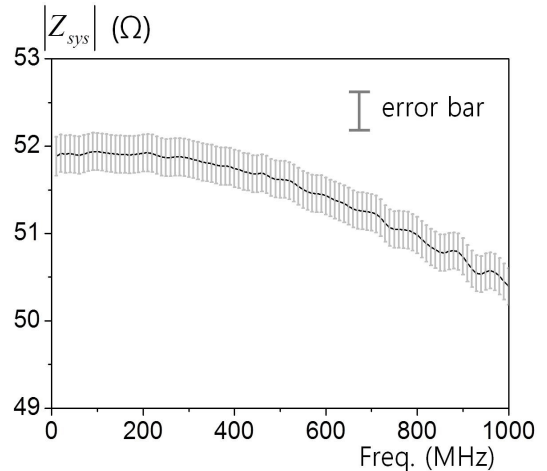


그림 4. 시스템 임피던스의 크기와 불확도
Fig. 4. Amplitude and uncertainty of system impedance.

그 불확도 u_{x_i} 의 상대적인 개념인 u_{x_i}/x_i 의 상대 불확도가 유용하게 사용된다. 여기에 포함인자 k_c 를 곱하면 상대 확장 불확도라는 결과를 얻는다^[4]. 앞서 설명한 $V_{m,k}$, $H_{sys,k}$, J_k , T_k , Δf 의 주요 5 변수에 관한 상대불확도의 향으로 표현된 V_k 의 상대 확장 불확도는 식 (9)와 같다.

$$U_{V_k} = k_c \frac{u_{V_k}}{V_k} = k_c \sqrt{\left(\frac{u_{V_{m,k}}}{V_{m,k}}\right)^2 + \left(\frac{u_{H_{sys,k}}}{H_{sys,k}}\right)^2 + \left(\frac{u_{J_k}}{J_k}\right)^2 + \left(\frac{u_{T_k}}{T_k}\right)^2 + \left(\frac{u_{\Delta f}}{\Delta f}\right)^2} \quad (9)$$

식 (9)의 제곱근 내의 열 개 항들을 앞선 2절에서의 방법으로 구하였고, 이들 10개 항들로 구성된 주요 5개 불확도 요인에 대한 상대 불확도가 전체 불확도에 차지하는 비중을 그림 5에 나타내었다. 대부분의 불확도는 $V_{m,k}$, $H_{sys,k}$, T_k 세 항과 그 불확도 때문에 결정된다. 특히 $V_{m,k}$, $H_{sys,k}$ 의 항에 의한 요인이 큰 비중을 차지하는데, 이는 그 불확도 요소들이 $V_{m,k}$, $V_{sys,k}$, $V_{ps,k}$ 등의 통계적으로 실측하는 스펙트럼 진폭 값들과 그 세부 불확도 항들로 직접적으로 복잡하게 구성되어 있기 때문이다.

포함인자 k_c 를 제외한 식 (9)의 모든 항을 구한 결과에, 정규분포로 가정한 경우 약 95 % 신뢰 수준으로는 포함인자 $k_c=2$ 를 곱하면 된다. 이 때 V_k 의 상대

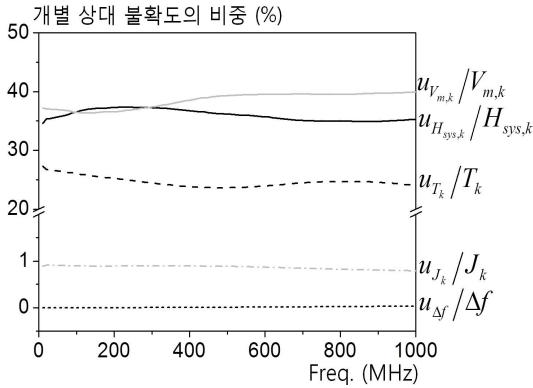


그림 5. 5대 주요 불확도의 상대적 비중
Fig. 5. Relative weight of the five main uncertainty factors.

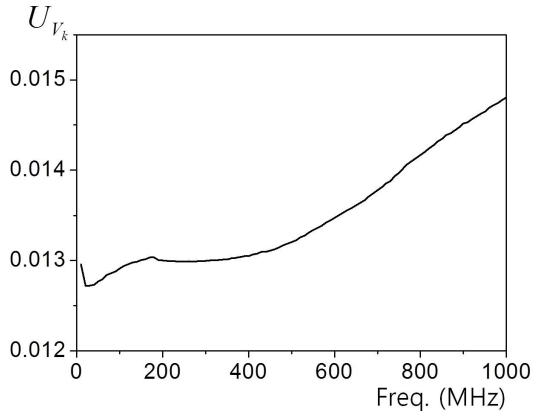


그림 6. 임펄스 스펙트럼 진폭의 상대 확장 불확도
Fig. 6. Relative expanded uncertainty of impulse spectrum amplitude.

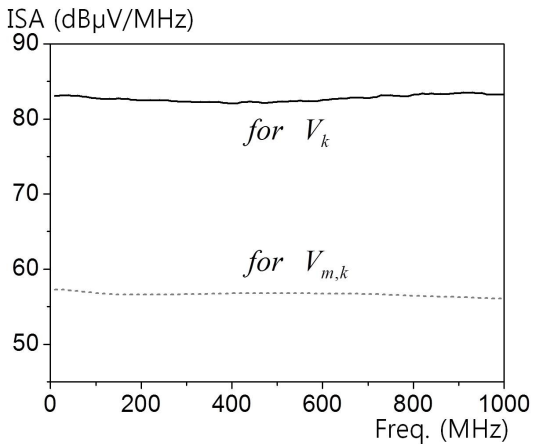


그림 7. 임펄스 스펙트럼 진폭 : $V_{m,k}$ (점선)과 V_k (실선)
Fig. 7. ISA : $V_{m,k}$ (dashed line) and V_k (solid line).

확장 불확도 U_{V_k} 는 그림 6과 같다.

임펄스 발생기로부터 발생되는 $50 \text{ dB } \mu\text{V}$ 출력을 20 dB 감쇠기와 지연분배기를 거쳐 측정된 진폭값 $V_{m,k}$ (그림 3 참조)와, 이들의 진폭 감쇠를 고려하여 (식 (2) 참조) 실제 임펄스 발생기의 출력에 대한 임펄스 스펙트럼 진폭 V_k 는 그림 7과 같다.

U_{V_k} 는 주파수 성분 k 에 대한 실수의 단순한 배열이지만 이를 위해서는 각각의 성분에 대해 그림 1 하부의 복잡하게 연계된 모든 부속 성분들이 결정되어야 한다.

본 논문에서 제시된 평가 방법으로는 1 GHz 대역에서 1.5% ($\approx 0.13 \text{ dB}$) 이내의 상대 확장 불확도를 가지므로 이는 국내 최고 수준의 ISA 불확도 수준이다. 세계 최고 수준은 미국 NIST의 0.1 dB이며^{[2],[3]}, 본 논문의 결과가 이에 미치지 못하는 것은 아직 실측하지 못하여 알려진 값보다 여유 있게 가정하여 사용한 몇 가지 요소와, 임피던스를 벡터회로망 분석기로 거시적으로 실측함으로써 임피던스의 불확도가 다소 확장되었기 때문이다. NIST의 경우, 논문에 사용되었던 여섯 가지 임피던스를 각각 분석적으로 모델링하여 그림 1의 하위 임피던스보다 한 단계 확장된 레벨에서 반(半) 수치적으로 해석하여 불확도를 줄이는 방법을 사용하였다. 향후 NIST와 비슷한 해석법을 사용하면 불확도를 개선할 수 있을 것으로 사료된다. 현 논문의 결과는 2% 전후의 세계 표준기관들에서 발표한 결과와 대등 또는 상회하는 수준이므로 이를 국내 산업체 관련 장비 교정 서비스에 적극 활용할 계획이다.

V. 결 론

본 논문에서는 국내 EMI/EMC 교정용 1 GHz 대역 임펄스 발생기의 스펙트럼 불확도를 평가하기 위한 방법과 그 결과를 제시하였다. 불확도 요인을 성분별로 분해하여 각 성분을 구하는 실험적 구성과 수치적 모델을 제시하였다. 불확도 요인별로 이들이 전체적인 불확도 결과에 미치는 상대적 영향과 수치적 결과를 나타내었다. 분석된 상대 확장 불확도는 1 GHz 대역에서 1.5% (= 0.13 dB) 이내이고, 이는 새롭게 보고되는 국내 최고 수준의 임펄스 스펙트럼 진폭의 불확도 수준이다.

부록: 용어 정리

용어	용어 정의 (k 번째 주파수 성분에 대한)	용어	용어 정의 (k 번째 주파수 성분에 대한)
U_{V_k}	스펙트럼 진폭(V_k)의 상대 확장 불확도	V_{src}	신호원의 진폭
V_k	시스템의 오차 성분이 보정된 스펙트럼 진폭	T_{sys}	측정 시스템의 전달계수
u_{V_k}	V_k 의 불확도	$u_{T_{sys}}$	T_{sys} 의 불확도
$u_{\Delta f}$	주파수 간격(Δf)의 불확도	$\sigma_{V_{sys,k}}$	$V_{sys,k}$ 의 표준편차
$V_{m,k}$	측정한 임펄스의 스펙트럼 진폭	T_{ps}	전력센서의 전달계수
$u_{V_{m,k}}$	$V_{m,k}$ 의 불확도	$u_{T_{ps}}$	T_{ps} 의 불확도
$H_{sys,k}$	측정 시스템의 전달 함수	$u_{\alpha_{ps}}$	전력센서 효율(α_{ps})의 불확도
$u_{H_{sys,k}}$	$H_{sys,k}$ 의 불확도	$\sigma_{p_{ps,k}}$	전력센서 전력값의 표준편차
J_k	Jitter 스펙트럼	Z_{src}	신호원의 임피던스
u_{J_k}	J_k 의 불확도	Z_{sys}	시스템의 임피던스
T_k	DUT에서 측정 시스템까지의 전달계수	$u_{Z_{sys}}$	Z_{sys} 의 불확도
u_{T_k}	T_k 의 불확도	Z_{ps}	전력센서의 임피던스
$\sigma_{V_{m,k}}$	$V_{m,k}$ 의 표준편차	$u_{Z_{ps}}$	Z_{ps} 의 불확도
u_{alias_k}	alias의 불확도	Z_{src+ps}	신호원과 전력센서의 임피던스
\bar{j}_t	trigger jitter의 평균	$u_{Z_{src+ps}}$	Z_{src+ps} 의 불확도
$\sigma_{\bar{j}_t}$	trigger jitter의 표준편차	$Z_{src+sys}$	신호원과 시스템의 임피던스
$V_{sys,k}$	시스템의 스펙트럼 진폭	$u_{Z_{src+sys}}$	$Z_{src+sys}$ 의 불확도
$u_{V_{sys,k}}$	$V_{sys,k}$ 의 불확도	Z_{DUT}	DUT의 임피던스
$V_{ps,k}$	전력센서의 스펙트럼 진폭	$u_{Z_{DUT}}$	ZDUT의 불확도
$u_{V_{ps,k}}$	$V_{ps,k}$ 의 불확도		

참 고 문 헌

[1] 이주광, "Pulse parameter 표준", 기반표준본부 보고
고서, 한국표준과학연구원, 2000년 11월.
[2] [http://kcdb.bipm.org/appendixc/country_list.asp? Sservice=EM/RF.11.6](http://kcdb.bipm.org/appendixc/country_list.asp?Sservice=EM/RF.11.6).

[3] N. G. Paulter, D. R. Larson, "Impulse spectrum amplitude uncertainty analysis", *Metrologia*, vol. 43, pp. 477-485, Oct. 2006.
[4] "Guide to the expression of uncertainty in measurement: GUM", ISO/IEC Guide 98-3, 2008.

이 동 준



1995년 2월: 건국대학교 물리학과 (이
학사)
1996년 2월: 건국대학교 전자공학
과 (공학사)
1999년 1월: 미국 Polytechnic Univ.
전기전자공학과 (공학석사)
2008년 12월: 미국 Univ. of Michi-
gan 전기전자공학과 (공학박사)

1999년 10월~2002년 8월: 삼성전자 무선사업부 선임연구원
2009년 2월~현재: 한국표준과학연구원 전자파센터 선임연
구원

2012년 3월~현재: 과학기술연합대학원대학교 측정과학부
겸임부교수

[주 관심분야] 전기광학 기반 안테나 측정, 초고출력 측정
용 전기광학 센서 개발, 광기반 벡터회로망분석기 제작,
광기반 초고속 펄스 측정 시스템 개발

권 재 용



1995년 2월: 경북대학교 전자공학
과 (공학사)
1998년 2월: 한국과학기술원 전기 및
전자공학과 (공학석사)
2002년 2월: 한국과학기술원 전기 및
전자공학과 (공학박사)
2002년 2월~2005년 3월: LG전자기
술원 소재재료연구소 선임연구원

2005년 4월~현재: 한국표준과학연구원 전자파센터 책임연
구원

[주 관심분야] 전자파 측정표준(전자파 전력, EMC 안테나
등)

이 주 광



1984년 2월: 한양대학교 전자공학
과 (공학사)
1994년 8월: 한국과학기술원 전기 및
전자공학과 (공학석사)
2000년 8월: 한국과학기술원 전기 및
전자공학과 (공학박사)
1986년 7월~현재: 한국표준과학연
구원 전자파센터 책임기술원

[주 관심분야] 전자파 측정표준(감쇠량, 펄스 특성), EMC
측정표준, 광기반 초고속 펄스 측정 시스템 개발

강 태 원



1988년 2월: 경북대학교 전자공학
과 (공학사)
1990년 2월: 포항공과대학교 전자전
기공학과 (공학석사)
2001년 2월: 포항공과대학교 전자전
기공학과 (공학박사)
1990년 2월~현재: 한국표준과학연
구원 전자파센터 책임연구원

[주 관심분야] 전자파 측정표준(잡음, 전력), EMC 측정표
준