

고전압 표준측정 시스템 연구

한국전기연구원
김익수 박사

1. 서론

전기에너지는 수송, 변환, 제어 등의 편리한 점 때문에 산업 발달과 경제향상에 따라 급격히 수요가 증가하고 있으며, 효율적인 수송을 위하여 초고전압 송전을 행하게 된다. 이러한 초고전압 송전과 더불어 양질의 전력을 공급하기 위하여 전력계통에 운용될 전력기기의 절연성능 검증은 필수적이다. 이 절연성능의 검증은 실제 사용되는 전압뿐만이 아니라 과도적으로 발생하는 이상전압에 대하여도 전력기기 절연이 견딜 수 있음을 보이는 것이다. 이러한 이상전압 발생원으로는 1선지락 등에 의해 발생하는 교류성 이상전압, 차단기, 단로기 등의 개폐기 동작에 의한 내부 이상전압 및 뇌격에 의한 상당히 높은 외부 이상전압이 있다. 이 중 초고전압 전력기기 절연성능에 있어서 중요한 요소는 개폐기 동작에 의한 개폐 서어지와 뇌격에 의한 뇌서어지이다. 이러한 서어지를 모의한 충격전압은 극히 단시간에 최대치까지 상승하고, 또 단시간에 零 전압으로 감쇄하는 과도적인 전압이므로, 충격전압 특성 평가를 정확하게 행하기 위해서는 측정분야에 대한 충분한 지식과 경험이 중요하다.

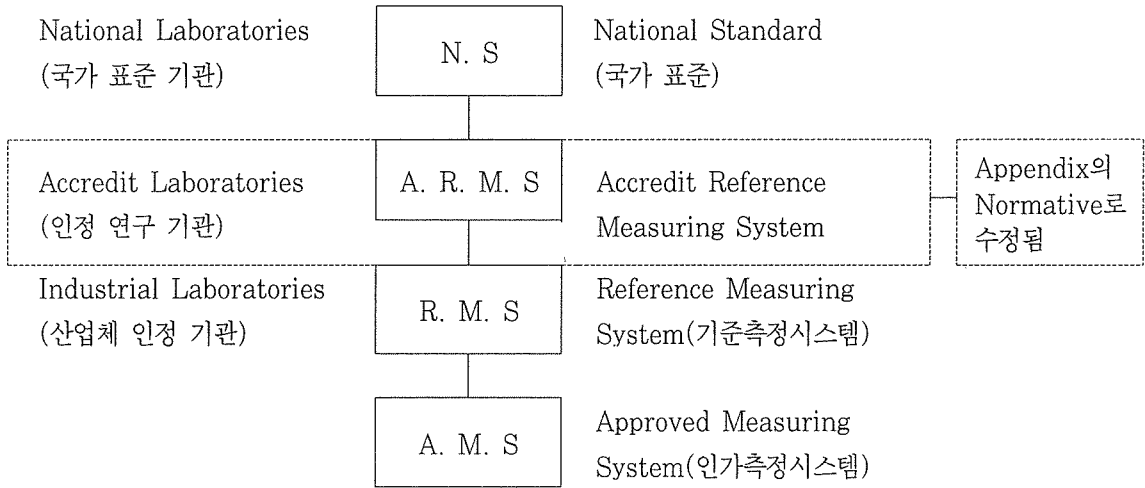
측정분야의 기술진보에 따른 분압기의 성능 및 측정精度에 더욱 엄격한 정확성이 요구되고 있다. Feser는 응답시간이 45ns의 분압기로 표준 뇌충격 전압의 파두장($1.2\mu\text{s} \pm 30\%$)을 측정하는 경우, 파두장이 가장 급준한 $0.84\mu\text{s}$ 에 있어서는 약 50%까지의 차이가 발생함을 보고하고 있다[1].

이 때문에 국제 전기기술 위원회(IEC: International Electrotechnical Commission)에서는 고정확도의 충격전압 측정요건과 함께 고전압 시험기술의 국제 규격화를 도모하도록 그림 1 및 표 1과 같은 국가표준의 소급성(traceability) 확보에 의한 측정 정확도를 유지하도록 하는 제도를 도입할 것을 제시하고 있다[2]. 소급성은 전압, 전류 등의 표준과 측정계의 精度를 가능한 직접적인 방법으로 관계짓는다는 것을 의미한다. 이의 표준적인 방법은 측정시스템의 상호비교를 통하여 기준시스템에 대한 불확도(Uncertainty)를 나타내는 것이다. 이에 대하여 독일, 호주, 오스트리아, 영국, 일본 등에서는 이 규격에 바탕을 둔 정도가 높은 분압기의 개발 및 국제간 성능비교를 수행하여 특성을 발표하고 있다[3-4]. 한편 표준적인 방법을 행할 수 없는 경우, 즉 고정도 분압기의 시제작의 경우는 대응적인 방법

인 직각파에 대한 응답특성의 각종 파라미터를 측정, 분석하는 것이다[5, 6].

본 연구에서는 국제적인 추세에 대응하기 위하여 충격전압의 측정시스템, 즉, IEC60060-2의 기준측

정시스템(Reference Measuring System)으로서 고성능을 갖는 쉘드 저항 분압기를 설계, 제작하여高精度 측정시스템을 구성하였다.



(그림 1) IEC 규정에 의한 고전압 측정시스템 소급성

<표 1> 고전압 측정의 소급성(Traceability)과 불확도(Uncertainty)

	DC	AC	LI				SI	
			전 파		파두재단파		파고치 (%)	시 간 (%)
	평균치/ripple(%)	파고치 (%)	시 간 (%)	파고치 (%)	시 간 (%)	파고치 (%)		
N. S 국가 표준 측정시스템	(0.3)/ (1)	(0.3)	(0.5)	(1.5)	(1)	(5)	(0.5)	(1.5)
R. M. S 기준 측정시스템	1/3	1	1	5	3	5	1	5
A. M. S 인가 측정시스템	3/10	3	3	10	5	10	3	10

() : STL(Short - Circuit Testing Liaison)에 의한 제한치

2. 국내·외 기술개발 동향

가. 국외의 경우

현재 전력계통에 있어서는 교류, 직류전압 1MV, 전자현미경에는 3MV, 가속기에는 20MV 정도까지의 고전압이 사용되고 있고, 뇌격등에 의한 피뢰기로 유입되는 충격전류는 100kA까지 규격에 규정되어 있으며, 우리나라 및 세계 계통의 단락전류는 63kA까지 확대된 상태이다. 고전압 대전류 기기는 계측에 의존하는 부분이 현저하게 큰 전형적인 기술이라고 할 수 있는데, 즉, 소재의 특성에서 완성품까지의 내전압 시험, 실용중의 열화의 판정 및 대전류 특성평가 등, 일련의 계측 기술이 밀접한 관계가 있다. 따라서, 보다 정밀하고 넓은 scale의 계측, 표준기술은 기기의 설계, 제작, 시험안전, 공정한 전력 무역 및 연구개발에 필수적이다.

(1) 일본의 경우

전자기술 총합연구소에서는 기초 표준을 담당하고, 일본전기계기 검정소에서는 전자기술 총합연구소에서 이전된 기초 표준을 기준으로, 표준기, 계측기를 교정하여, 電氣諸量の 표준을 유지함과 더불어, 산업계에서의 교정의뢰에 응하여 표준의 제공을 하고 있다. IEC 고전압시험의 요구를 만족하기 위하여, 직류 200kV, 교류 300kV로의 확장을 계획하고 있다. 세계적으로 많은 국가에서는 단일의 연구소가 전체의 표준을 담당하고 있으나, 일본, 프랑스, 이탈리아 등의 국가는 複數의 연구소가 분야마다 국가 표준을 담당하는 경우가 있다.

(2) 네델란드의 경우

네델란드 KEMA의 시험 검사기관은 교정 및 시험 인정을 모두 취득하였으며, 고전압 교정 범위는 표 2와 같다.

〈표 2〉 KEMA의 기준 측정시스템(RMS : Reference Measuring System)

측정 종류	범 위	精 度	비 고
교 류 전 압	2.5~277kV까지(50Hz) 23~277kV까지(50Hz, 60Hz)	0.4% 이하 0.4% 이하	NKO certificate
직 류 전 압	0~200kV 0~400kV(계획중)	1% 이하 1% 이하	NKO certificate
뇌 충격 전 압	10~500kVp	1% 이하 0.5% 이하 (PTB)	교정
개 폐 충격 전 압	100~1, 800kVp	3% 이하	시험
충 격 전 류	1~100kA	3% 이하	시험
교 류 전 류	25A~65kA(50Hz)	0.4% 이하	NKO certificate
전 류 비 교 정	250A~65kA(50Hz)	$1 \times 10^{-4} I_i / I_u$ 50 μ rad	NKO certificate
전 압 비 교 정	2.5~277kV까지(50Hz, 60Hz)	$1 \mu 10^{-4} U_i / U_u$ 50 μ rad	NKO certificate

(3) 이탈리아의 경우

1992년 이탈리아 CESI는 IEN(국립전기 표준 연구소)에서 저전압(DC)에 관한 소급성을 갖고, SIT center(2차 계량 표준연구소)의 지정을 받았다. 이것을 기초로 기준기 100kV(DWINA)를 구매하여 직류, 교류, 충격전압의 교정을 하고 있고, 300kV까지 상승할 예정으로 되어 있다. 불확실성을 요소별로 적산하여 자기 평가하여 공개하는, 즉 자기선언을 목표로 하고 있다. 1992년 CESI는 SINAL에서 고전압 시험소 인정을 받아, 약 70건의 국제 규격, 시험의 종류로써 158종에 달한다.

1994년에는 SINCERT(국가 인증 인정기구)로부터 제품 인증에 관한 인정을 취득하였다. 대상분야는 저전압 제품과 고전압 제품(AC 1,000V이하, DC 1,500V이하 및 고전압 : 각각 CESI-LV, CESI-HV로 분류)으로, 시장 개방을 향한 것이다.

(4) 필란드의 경우

필란드 헬싱키 대학은 북유럽 3국(필란드, 스웨덴, 노르웨이)과 덴마크를 대표한, 스칸디나비아 고전압 표준 연구소와 고전압 인정 시험소의 역할을 하고 있으며, 대상시험은 다음과 같다: 뇌충격 시험과 개폐충격시험(건조 및 주수), AC 시험(건조 및 주수), 직류 전압 시험, 단락 시험 40kAp, 온도 상승 시험, 기계적 시험, 환경 시험(온도, 습도, 열 shock, RIV, 부분방전 시험)

나. 국내의 경우

(1) 한국표준과학연구원

기초 표준인 1V, 1Ω에 있어서 0.2ppm정도의 교정이 가능하며, 표준계기용 변압기(14.4kV, 5VA (정격분담), 20ppm), 고압용 저항 분위기(직류 100kV, 100MΩ, 10ppm), 50kV 교류용 분압기

를 보유하고 있다.

(2) 한국전기연구원

1982년 이후로 초고압·대전류 분야에 대한 아래와 같은 설비 및 연구, 시험 경험이 있음.

- 교류전압 발생기(Test transformer) : 1,100kV의 교류전압 발생
- 충격전압 발생기(Impulse Voltage Generator) : 4MV의 충격 전압 발생
- 천고 26.3m, 실험장면적 1,750m²의 실험장
- 고천고 실험장의 천장 및 내벽은 쉴드 역할이 가능한 구조임.
- 고천고 실험장의 바닥은 접지 Mesh를 포설하였음.
- 고천고 실험장의 천장에는 피시품 설치용으로 5Ton의 크레인 구비
- 1989년 : 100kV급 충격전류 발생기 연구개발
- 1991년 : 600kV급 뇌충격전압 발생기 연구개발
- 1996년 : 700kV급 뇌충격전압 표준분압기의 Prototype 연구개발
- 1997년 : 500kV급 개폐충격전압 표준분압기의 Prototype 연구개발
- 1998년 : 700kV급 뇌충격전압 측정시스템의 비교시험
- 1998년 : 500kV급 개폐충격 측정시스템의 비교시험

3. 기술개발 내용

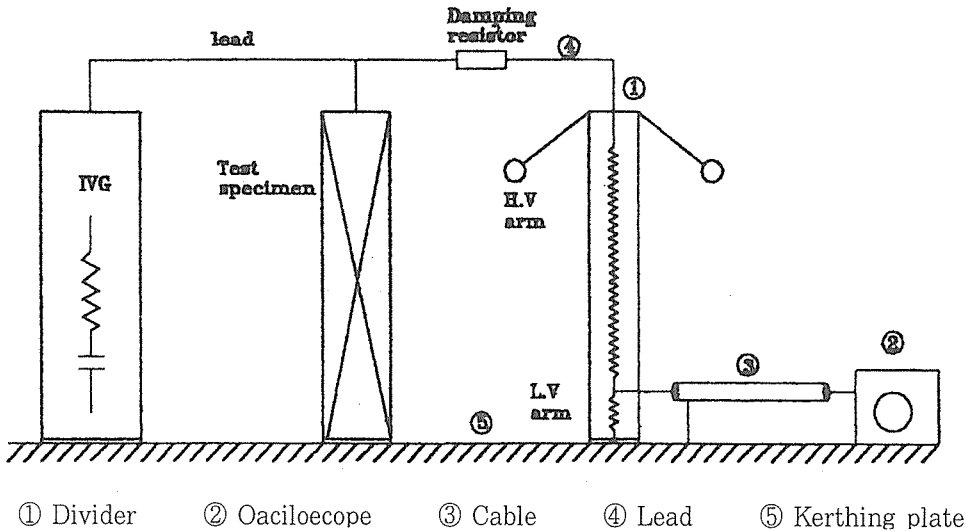
가. 충격전압 측정시스템의 구성

충격전압의 측정시스템은 그림 2와 같이 5가지로

나눌 수 있으며, 시료 단자간에 걸리는 전압크기, 시간함수로서의 파형을 나타낸다.

- ① 전압 분압기(voltage divider)
- ② 기록계(recording oscillograph)
- ③ 분압기와 기록계를 상호연결하는 동축 케이블

- ④ 분압기 상부에서 시료의 고압 단자를 연결하는 연결선(lead)
- ⑤ 분압기 접지부에서 시료의 접지측까지 연결하는 접지선 또는 접지판



(그림 2) 충격전압 측정시스템의 구성

나. 뇌충격전압 측정시스템

(1) 분압기의 기본 설계시 고려사항

뇌충격전압 측정에 있어서 고정확도를 가지기 위해서는 분압기의 응답 특성이 우수하여야 하며, 측정의 대상인 충격전압에 대하여 충분한 절연강도 및 열용량을 가져야 한다. 용량 분압기는 분압비가 고압부와 저압부의 정전용량에 의하여 결정되는데, 콘덴서의 정전용량 특성과 근접물체의 영향 등으로 인하여 고정확도를 위한 필요한 높은 안정성의 유지가 곤란하다고 알려져 있다. 저항 분압기는 고·저압부 저항값에 의하여 분압비가 결정되며, 충분한 안정성을 가진다. 저항분압기의 응

답특성을 개선하기 위해서 다음과 같은 방법이 있다[7].

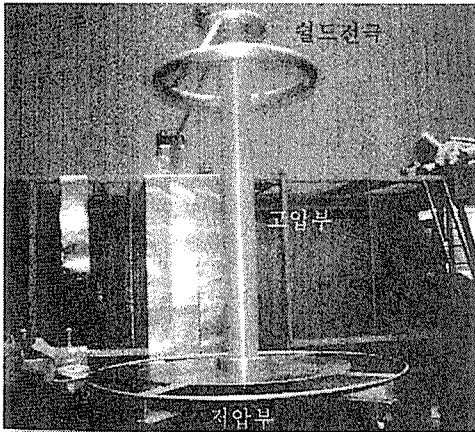
- ① 쉘드링을 갖추는 방법, ② 분압기의 크기를 축소시킴으로써 표류용량을 감소시키는 방법, ③ 분압기의 저항값을 작게 하는 방법, ④ 분압기의 직렬커패시턴스를 크게 하는 방법이 있다.

쉘드링을 갖는 방법은 고압부의 표류용량의 영향을 적게하며, 고압부의 저항치가 높은 경우에 유효하므로 이 방법을 적용하여 그 특성을 연구하였다.

(2) 분압기의 권선법 및 구성

고압측 저항선의 권선법은 인덕턴스가 가능한 작

도록 무유도 권선법을 사용하였으며, 표피효과와 온도상승을 고려하여 높은 저항률($133\mu\Omega\text{-cm}$)과 낮은 저항-온도 계수($\pm 20 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)를 갖는 저항선을 선택하였다. 사용전압 500kV를 만족하도록 2.66k Ω 의 저항체 3조를 직렬로 연결하여 분압기 고압부를 구성하였다. 저항측은 열용량 및 내전압을 고려하여 10 Ω 의 무유도 저항체 2개를 직렬로 구성한 8조를, 방사상으로 병렬로 구성, 합성 저항 5 Ω 으로 하여 전체를 구리 금속통에 넣었다. 그림 3은 시제작한 분압기의 전경을 나타낸다. 분압기의 정점부에는 고리형태 쉴드 링(직경 1.5m)을 취부하여, 고전압측 저항체의 전위분포 개선과 저항체의 표류정전용량을 보상, 응답특성이 개선되도록 하였다.



(그림 3) 시제작 개발된 뇌충격전압용 분압기의 전경

(4) 시제작된 뇌충격전압용 분압기의 특성 평가

IEC 규격에 의하면 기준 측정시스템의 성능확인 은 표준적 방법으로서의 직접비교시험과 확보된 기준 측정시스템이 없는 경우의 대응적 방법으로 나누

어 제시하고 있다.

(가) 특성시험 및 직각파 응답특성

시제작된 쉴드 저항분압기는 700kV까지 사용할 수 있도록 고압부의 내전압 성능을 갖도록 하였다. 이 성능시험을 위하여 700kV 충격 내전압시험을 행하여 확인하였고, 특성 평가는 직각파 발생기기를 사용하여 직각파를 인가하고, 디지털 오실로스코프 (8bit, 2GSamples/sec)로 응답특성을 측정, 평가 하였다. 표 4에 시제작된 뇌충격전압용 분압기의 직각파응답특성의 결과를 나타내었으며, 이는 IEC의 기준 측정시스템으로서의 규정치를 만족하는 값이었다.

(표 4) 시제작 개발된 뇌충격전압용 쉴드 저항분압기의 직각파 응답 특성

특성파라메타	IEC규정값(전파의 경우)	개발품의 특성값
T_a	$\leq 30\text{ns}$	27ns
T_N	$\leq 15\text{ns}$	14ns
T_s	$\leq 200\text{ns}$	120ns

(나) 오스트레일리아 CSIRO와의 비교시험 결과 IEC 규격에 의한 파형의 허용은 파두장 : $1.2\mu\text{s} \pm 30\%$ 파미장 : $50\mu\text{s} \pm 20\%$ 으로 되어 있다. 그런데 이 허용 범위내에 있어서, 시험할 시료에 가장 가혹한 조건은 파두장이 가장 짧고($0.86\mu\text{s}$), 파미장이 가장 긴 ($60\mu\text{s}$)의 경우의 파형이다. 본 비교 시험은 가혹한 조건을 상정하여 파두장 : $0.9\mu\text{s}$, 파미장 : $60\mu\text{s}$ 의 파형을 인가하였다. 표 5는 정극성 전압인가시의 분압비(SF : Scale Factor), 파두장, 파미장에 대한 비교시험 결과를 나타낸 것이다.

〈표 5〉

뇌충격전압 0.9/60 μ s 정극성 전압인가시에 있어서 비교시험 결과

(a) 분압비의 경우

인 가 전 압 파고치 (kV)	측정 오실로스코프 전압 크기(V/div)	SF의 편차(%)	SF편차의 불확도* (%)
+151.9	0.5	+0.4	0.4
+200.6	0.5	+0.2	0.4
+563	2	-0.1	0.4
+566	2	-0.5	0.4
+703	2	+0.4	0.4
+703	2	+0.3	0.4

(b) 파두장(T₁)의 경우

인 가 전 압 파고치(kV)	측정 오실로스코프 전압 크기(V/div)	T ₁ * (μ s)	측정된 T ₁ 의 편차 (%)	T ₁ 편차의 불확도(%)**
+151.9	0.5	0.88	-0.6	1.7
+200.6	0.5	0.89	-0.5	1.7
+396	1	0.89	+0.5	1.7
+563	2	0.90	+1.1	1.7
+566	2	0.84	-0.1	1.7
+703	2	0.88	+1.1	1.9
+703	2	0.91	+1.6	1.9

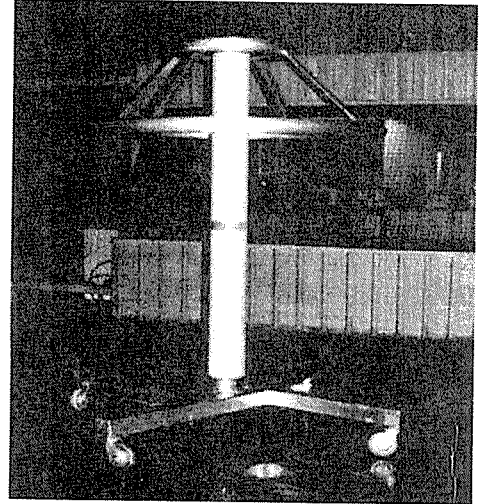
(c) 파미장(T₂)의 경우

인 가 전 압 파고치(kV)	측정 오실로스코프 전압 크기(V/div)	T ₂ * (μ s)	측정된 T ₂ 의 편차 (%)	T ₂ 편차의 불확도(%)**
+151.9	0.5	59.9	0.0	1.0
+200.6	0.5	60.3	-0.4	1.0
+396	1	61.2	-0.3	1.0
+563	2	62.7	-0.8	1.0
+566	2	62.1	-0.7	1.0
+703	2	63.2	-0.1	1.0
+703	2	63.1	0.0	1.0

다. 개폐충격전압 측정시스템

(1) 개폐 충격전압용 기준분압기의 정격

IEC 60060-2에 의하면, 비교 교정시험의 경우 시험전압은 기준분압기의 정격전압 5배까지 교정할 수 있으므로[2], 제조조건을 고려하여 정격전압을 500kV로 정하였다. 이는 실제의 피교정기기 정격전압 2,500kV까지가 가능하므로 실용상 지장이 없다고 사료된다. 일례로 800kV 전력기기의 개폐 충격 내전압은 1,425kV이고[8], 중전기 산업체 및 연구소가 가지고 있는 충격발생기의 개폐 충격전압은 2,400kV 정도이다.



(그림 4) 시제작한 개폐충격전압용 쉘드저항분압기의 모습

(2) 분압기 형태

개폐 충격전압용 기준분압기는 특성의 경년 변화가 없어야 하며 온도 및 주위조건에 따라 분압비가 변화하지 않아야 하는 안정성이 가장 중요하다. 개폐 충격전압은 파두장(250 μ s)과 파미장(2500 μ s)이 길어 저항분압기의 경우 뇌충격전압(1.2 \times 50 μ s)에 비하여 약 46배의 온도상승에 대한 열용량이 필요하다. 따라서 종래부터 개폐충격전압 측정용으로는 용량분압기가 사용되어 왔으나, 이는 온도계수가 작은 고전압용 커패시터를 갖추지 못하고, 또한 장시간에 걸친 용량의 경년 변화에 관한 자료가 없고,

주위의 근접물체의 영향을 받기 쉽기 때문에 기준분압기로서 사용을 기피하는 것으로 보고되고 있다. 이러한 이유로 가장 안정하고 열용량을 만족시킬 수 있는 고저항을 사용한 저항분압기를 본 연구를 위해 제작하여 측정에 이용하였다. 또한 응답특성 개선을 위하여 쉘드 전극을 설치하였고, 저항부는 무유도로 하였다. 그림 4는 시제작한 개폐충격전압용 쉘드 취부형 高抵抗 분압기의 모습이다.

<표 6> 개폐 충격 전압에 있어서 비교시험 결과 (250/2,500 μ s 정극성 인가시)

(a) 분압비의 경우

인가전압 파괴치(kV)	측정 오실로스코프 전압 크기(V/div)	SF의 편차 (%)	SF편차의 불확도*(%)
+113.4	1	+0.2	0.5
+227	2	-0.3	0.5
+309	2	-0.1	0.5
+407	5	+0.4	0.5
+506	5	+0.2	0.5

* Uncertainty of SF deviation(%) is the uncertainty in the deviation of the SF from its assigned value expressed as a percentage of the assigned value.

(b) 파두장(T_P)의 경우

인가전압 파고치 (kV)	측정 오실로스코프 전압 크기(V/div)	T_P^* (μs)	측정된 T_P 의 편차 (%)	T_P 편차의 불확도(%)**
+113.4	1	247	+0.9	2.0
+227	2	249	0.0	2.0
+309	2	248	+0.3	1.9
+312	2	249	0.0	1.9
+407	5	252	-0.6	2.0
+506	5	249	+0.3	1.9

* Uncertainty of T_P : 1.5%

** Uncertainty of T_P error(%) is the uncertainty in the measured T_P error of the test system expressed as a percentage of T_P

(c) 파미장(T_2)의 경우

인가전압 파고치 (kV)	측정 오실로스코프 전압 크기(V/div)	T_2^* (μs)	측정된 T_2 의 편차 (%)	T_2 편차의 불확도(%)**
+113.4	1	2.49×10^3	-0.9	1.2
+227	2	2.51×10^3	-1.0	1.2
+309	2	2.48×10^3	-0.6	1.2
+312	2	2.49×10^3	-0.6	1.2
+407	5	2.50×10^3	-0.9	1.2
+506	5	2.48×10^3	-1.7	1.2

* Uncertainty of T_2 : 1.5%

** Uncertainty of T_2 error(%) is the uncertainty in the measured T_2 error of the test system expressed as a percentage of T_2

(3) 개폐 충격 전압에 있어서 비교 시험 결과

IEC 규격에 의한 표준 파형은 파두장 : $250\mu s \pm 30\%$ 파미장 : $2,500\mu s \pm 20\%$ 으로 되어 있다. 표 6은 정극성 개폐 충격 전압 인가시의 분압비, 파두장, 파미장에 대한 비교시험 결과를 나타낸 것이다.

4. 결 론

뇌충격전압 및 개폐충격전압 측정에 있어서 IEC 60060-2에 의거한 기준 측정시스템을 국내에 구축하기 위하여 전계 계산을 통한 쉘드 전극 구성, 뇌충격 및 개폐충격전압 파형에 따른 분압기 저항체의 온도 특성 분석 등에 의한 기준 분압기로서의 성능

을 갖도록 하였고, 시제작된 측정시스템에 관한 직각과 응답 특성 평가 및 비교시험을 행하였다.

우리나라의 고전압 전력기기의 절연성능을 평가하는데 필수적인 충격전압의 측정에 있어서, 국제 비교시험을 행한 당 연구원의 기준 분압기와의 비교 시험을 통하여 기업체가 보유하고 있는 충격전압 측정시스템의 소급성을 증명할 필요가 있다. 이 비교 시험은 우리의 우수한 제품성능을 국제적으로 인정받도록 하는 기본적 요소이므로, 기업체에서는 전문적인 지식을 가진 사람이 이를 전담토록 하여야 하며, 적절한 시기에 기업체가 보유하고 있는 충격전압 측정시스템의 정확도에 대하여 검증할 필요가 있다. 특히, 고전압 대전류 표준 측정, 즉 고전압 대전류 교정은 소급성의 확립이 미완성된 분야이므로 이를 단기간에 완성을 하기는 어렵기에 우리나라도 이에 대한 충실한 준비가 없으면 세계의 흐름에 뒤떨어질 위험이 있다.

당 연구원에서는 이를 위하여 기술적인 지원을 하도록 대책을 강구하며, 또한, 기준 시스템 나아가서는 국가 표준시스템으로서의 확보를 위하여 정확도가 높은 기기의 확보 및 국제 비교시험을 통한 교류, 인정을 받아 들 필요가 있다.

참고문헌

(1) K. Feser, "Update on IEC 60-High volta-

ge test technique", CIGRE 33-94 (WG03), 1994

- (2) IEC 60060-2, High-voltage test techniques, Part 2 : Measuring Systems, 1994.
- (3) M. Aro, J. Hallsron, Mil Pykla. "Inter-comparison of impulse voltage measuring systems at 600kV level Experience and practical problems", 8th ISH 50. 03, 1993.
- (4) J. Rungis, M. Ishii, Y. Cuny, K. Schon, "Intercomparison of impulse divided from PTB in Australis, Japan and China", 8th ISH 50. 02, 1993.
- (5) 김익수, 이형호, 조정수, 박정후, "전파 뇌충격 전압 측정용 쉴드저항분압기의 직각과 특성에 관한 연구", 대한전기학회 논문지 45권 2호, 1996. 2
- (6) 김익수, 이형호, 조정수, 박정후, "개폐 충격전압 측정용 쉴드저항분압기의 직각과 특성에 관한 연구", 대한전기학회 논문지 48 C권 12호, 1999. 12
- (7) 高電壓 試驗 ハンプシク 電氣學會 綠色試驗法 ハンプシク 改訂委員會, 1983년
- (8) IEC 60694, Common specifications for high-voltage switchgear and controlgear standards, 1996-05