원전 증기발생기 와전류검사 장치의 전기적 특성 측정

Electrical Characteristics Measurement of Eddy Current Testing Instrument for Steam Generator in NPP

이희종*[†], 조찬희*, 유현주*, 문균영*, 이태훈*

Hee-Jong Lee*[†], Chan-Hee Cho*, Hyun-Joo Yoo*, Gyoonyoung Moon* and Tae-Hun Lee*

초 록 원전 증기발생기는 원자로 냉각재 계통에서 발생한 열에너지를 터빈 계통의 주급수에 전달하여 터빈을 회전시키기 위한 증기를 생산하는 일종의 열교환기이다. 증기발생기 전열관의 손상은 증기발생기의 구조적 및 누설 건전성 유지 능력을 저해시키기 때문에 주기적으로 와전류검사를 수행하여 전열관의 건전성을 평가한다. 증기발생기 전열관의 건전성 평가는 보통 원자로 연료 재장전 기간 중에 수행된다. 현재 국내 증기발생기 전열관에 적용되는 와전류검사는 KEPIC 및 ASME 코드 요건에 따라 수행되며, 와전류검사 수행에 필요한 검사 시스템은 와전류검사 장치와 수집된 신호를 평가하기 위한 평가 프로그램으로 구성된다. 검사에 적용되는 와전류검사 시스템을 구성하는 핵심기기인 와전류검사 장치는 ASME 및 KEPIC 코드에서 총 고조파 왜곡율, 입력 임피던스, 증폭기 직선성 및 안정성, 위상 직선성, 대역폭 및 복조필터 응답, 디지털 변환, 채널 간섭 등과 같은 전기적 특성을 측정하도록 규정하고 있다. 이에 따라 본 논문에서는 국내 최초로 개발한 원전 증기발생기 와전류검사 장치의 전기적 특성 측정을 위한 ASME 및 KEPIC 코드 요건을 설명하고, 이 요건에 따른 증기발생기 와전류검사 장치의 전기적 특성의 측정 결과를 제시하였다.

주요용어: 와전류탐상검사, 와전류신호 발생, 전기적 특성 측정

Abstract A steam generator in nuclear power plant is a heatexchanger which is used to convert water into steam from heat produced in a nuclear reactor core, and the steam produced in steam generator is delivered to the turbine to generate electricity. Because of damage to steam generator tubing may impair its ability to adequately perform required safety functions in terms of both structural integrity and leakage integrity, eddy current testing is periodically performed to evaluate the integrity of tubes in steam generator. This assessment is normally performed during a reactor refueling outage. Currently, the eddy current testing for steam generator of nuclear power plant in Korea is performed in accordance with KEPIC & ASME Code requirements, the eddy current testing system is consists of remote data acquisition unit and data analysis program to evaluate the acquired data. The KEPIC & ASME Code require that the electrical properties of remote data acquisition unit, such as total harmonic distortion, input & output impedance, amplifier linearity & stability, phase linearity, bandwidth & demodulation filter response, analog-to-digital conversion, and channel crosstalk shall be measured in accordance with the KEPIC & ASME Code requirements. In this paper, the measurement requirements of electrical properties for eddy current testing instrument described in KEPIC & ASME Code are presented, and the measurement results of newly developed eddy current testing instrument by KHNP(Korea Hydro & Nuclear Power Co., LTD) are presented.

Keywords: Eddy Current Testing, Eddy Current Signal Generation, Electrical Characteristic Measurement

1. 서 론

원전 증기발생기는 원자로 냉각재 계통에서 발

생한 열에너지를 터빈 계통의 주급수에 전달하여 터빈을 회전시키기 위한 증기를 생산하는 일종의 열교환기이다. 증기발생기 전열관의 손상은 증기

발생기의 구조적 및 누설 건전성 유지 능력을 저해시키기 때문에 주기적으로 와전류검사를 수행하여 전열관의 건전성을 평가한다. 증기발생기 전열관의 건전성 평가는 보통 원자로 연료 재장전 기간 중에 수행된다. 현재 국내 증기발생기 전열관에 적용되는 와전류검사는 KEPIC 및 ASME 코드 요건에 따라 수행되며, 와전류검사 수행에 필요한 검사 시스템은 와전류검사 장치와 수집된 신호를 평가하기 위한 평가 프로그램으로 구성된다[1,2,6]. 검사에 적용되는 와전류검사 시스템을 구성하는 핵심기기인 와전류검사 장치는 ASME 및 KEPIC 코드 요건에서 총 고조파 왜곡율, 입출력 임피던스, 증폭기 직선성 및 안정성, 위상 직선성, 대역폭 및 복조필터 응답, 디지털 변환, 채널 간섭 등과 같은 전기적 특성을 측정하도록 규정하고 있다[3-5]. 이에 따라 본 논문에서는 원전 증기발생기 와전류검사 장치의 전기적 특성 측정을 위한 코드 요건에 대해 고찰하고 또한 새롭게 개발한 증기발생기 와전류검사 장치의 전기적 특성을 ASME 및 KEPIC 코드 요건에 따라 측정한 결과를 기술하였다.

2. 와전류검사 장치 개요

개발 완료한 와전류검사 장치[eddy current testing instrument, Fig. 1(b) 참조]는 복조기의 아

(a)

(b)

Fig. 1 (a) Block diagram of eddy current testing instrument unit, (b) developed eddy current instrument for steam generator

날로그 출력을 $-32768 \sim 32767$ 의 디지털 범위로 변환하기 위해 16-bit 디지털 변환기를 사용하며, 수평과 수직성분이 별도로 디스플레이 되어 모니터에 나타내진다. 모든 디지털 신호의 측정은 수집한 원데이터의 신호 위상 및 진폭의 조정을 하지 않은 원상태에서 수행하였다. Fig. 1(a)는 와전류검사 장치의 블록도이며 장치를 구성하는 각 파트의 기능은 다음과 같다[2-4].

- 탐촉자 가변 구동전압(variable probe drive) : 탐촉자의 가변 구동전압 기능에 의해 검사자가 코일에 가해지는 구동전압을 선택할 수 있다. 탐촉자 가변 구동전압을 증대시킬 경우 장치의 잡음이 증가되지 않은 상태에서 아날로그 신호 진폭이 커진다. 특수 코일의 설계를 위해 낮은 구동전압의 적용이 가능하고 와전류검사 장치의 탐촉자 구동전압의 범위는 1~20 Vpp 이다.
- 2단 전치증폭기(two-stage front end amplifier) : 와전류검사 장치는 2단 전치증폭기를 포함하고 있다. 첫 번째 전치증폭기의 이득은 22 dB로 설정되며, 두 번째 전단이득은 32 dB로 선택하거나 22 dB로 그냥 우회시킬 수 있다. 2단 전치증폭기의 기능은 더 큰 동적범위를 제공하고 와전류검사 모터회전팬케익탐촉자(MRPC)의 수명을 연장하는 것이다.
- 평형(balance) : 키보드 조작에 의해 프로그래밍 가능한 이득이 생성되기 전의 복조기 출력을 영에 근접하게 하는 하드웨어 영점 조정(null)을 수행한다. 평형은 복조기 출력의 영점 조정을 위해 튜브의 무결점 부위에서 코일을 여자시켜 이루어진다. 영점 조정시 아날로그 신호는 영점에 근접하게 되고 디지털변환기 범위의 중간에 위치하게 된다. 이에 따라 디지털변환 동적범위의 장점을 최대한 활용하게 된다.
- 프로그램에서 설정 가능한 이득 : 사용자의 선택이 가능한 이득 옵션에 의해 검사자는 디지털화 전 아날로그 신호 증폭의 정도를 선택할 수 있다. 프로그램 가능 이득값을 조정하여 신호 분해능과 신호 포화 사이의 절충이 가능하다. 만약 작은 결점신호의 분해능(각 신호의 bit수)이 중요할 경우에는 이 이득값을 증가시켜야 한다. 이에 따라 텐트 및 압연천이구역과 같은 큰 신호가 생성되고 신호가 꺾어져 신호 혼란이 어렵게 된다. 다른 한편으로 신호 분해능을 희생시키고 이와 같이 큰 신호가 꺾이지

않도록 이득값을 감소시킬 수 있다.

- 정현파 복조기 제어(sinewave demodulator control): 검사 주파수와 조화되는 고조파에서 사각파 대신에 정현파 복조기 참조신호를 사용하여 간섭신호에 대해 반응하지 않게 할 수 있다. 와전류검사 장치는 검사 주파수의 홀수 고조파 간섭신호를 감지할 수 있으며, 이를 위해서는 와전류검사 장치를 차폐시켜야 한다. 새롭게 개발된 와전류검사 장치는 정현파 복조기 참조신호를 사용하므로 이와 같은 간섭신호에 대해 반응하지 않는다.
- 32개 검사 주파수 : 와전류검사 장치는 검사자가 최대 32개 검사 주파수를 선택할 수 있다.
- 외부 다중송신 제어[external multiplexing(MUX) control] : 와전류검사 장치는 탐촉자 내에 다중송신기능을 갖는 배열형 탐촉자를 지원한다. 외부 다중송신 제어는 배열형 탐촉자를 구동시키는 직류전원과 타이밍 신호를 제공한다. MUX 제어는 8개 코일까지의 코일그룹을 지원하는 3 bit 계수기로 구성되어 있다. 이와 같은 기능에 의해 새롭게 개발된 와전류검사 장치의 신호 품질과 분해능이 개선되었다.

3. 와전류검사 장치의 전기적 특성 측정 요건 및 측정 결과

원전 증기발생기 와전류탐상검사에 적용되는 와전류검사 장치는 ASME Code Section XI, Mandatory App. IV 보충요건에 따라 전기적 특성을 측정한다. 이 보충요건은 와전류검사 장치에 관련된 필수변수를 규정하고, 필수변수 측정을 위한 규약을 규정하고 있다. 와전류검사 장치를 위한 필수변수는 교류신호 발생(signal generation), 증폭, 복조 및 필터링(amplification, demodulation, and filtering), 아날로그-디지털(A/D) 변환[analog-to-digital(A/D) conversion], 채널간섭(channel crosstalk) 등에 관련된다[3-5].

3.1. 총 고조파 왜곡률(Total Harmonic Distortion)

고조파 왜곡은 장치의 진폭 전달 특성에 존재하는 비직선성에 기인한다. 출력에는 기본주파수 뿐 아니라 기본주파수의 배수도 포함되어 있다.

와전류탐상검사 장치의 경우, 고조파 왜곡은 코일로 주입되는 정현신호의 품질을 측정하는 것이다. 총 고조파 왜곡은 기본 정현파 주파수와 비교한 백분율 왜곡 또는 주파수 스펙트럼 플롯 상에 나타난 가장 큰 사이드로브의 진폭과 비교한 진폭 데시벨(dB) 비로 표현되며 규정된 각 주파수에 대해 측정한다. 필수변수로 사용되었을 때에 최대 고조파 왜곡을 규정한다.

3.1.1. 측정 결과

총 고조파 왜곡률(THD)은 EPRI 지침서 요건에 따라 측정하였으며, 1 Vpp와 20 Vpp 구동전압에서 100 Hz~10 MHz 범위의 12개 다른 주파수에서 기본주파수 진폭을 가장 큰 로브진폭에 비교하여 평균 및 최고 왜곡 수준을 측정하였다. 와전류검사 장치의 주파수와 레벨을 시험하고자 하는 값으로 설정하고, 스펙트럼 분석기로 시험주파수의 크기(V1)를 측정하였다. 스펙트럼 분석기로 고조파 주파수의 크기(V2, V3, ..., Vn)를 측정하고, 측정된 두 개의 값으로 THD 값을 산출하였다. 산출식은 다음과 같으며 각 주파수에서 측정된 총 고조파 왜곡률은 아래 Table 1과 Fig. 2에서와 같다.

$$THD(\%) = \{(V_2 + V_3 + \dots + V_n) / V_1\} \times 100$$

Table 1 Measured total harmonic distortion(THD)

Probe Drive Signal Voltage: 1Vpp	Frequency	%	dB
	100Hz	0.4	-58.6
	500Hz	0.2	-63.6
	1kHz	0.2	-63.4
	10kHz	0.15	-66.4
	50kHz	0.13	-66.9
	100kHz	0.13	-66.8
	200kHz	0.11	-68.2
	300kHz	0.11	-68.2
	400kHz	0.12	-67.5
	500kHz	0.13	-66.8
	1MHz	0.12	-67.6
	5MHz	0.15	-66.2
	10MHz	0.39	-58.8

Fig. 2 Measured total harmonic distortion(THD)

3.2. 임피던스(Input & Output Impedance)

출력 임피던스는 장치의 출력 컨넥터에서 각 시험주파수에 대해 측정한다. 규정된 각 주파수에 대해 크기(magnitude) 및 위상(phase) 두 가지를 측정한다. 필수변수로 사용되었을 때에 출력(송신기) 임피던스의 입력(수신기) 임피던스 비의 공차를 규정한다[1]. 만약 반사(드라이버/픽업) 배열형태의 경우에 송신기와 수신기가 동일코일로 결선되어 있지 않다면, 입력 임피던스는 출력 임피던스와 독립적으로 측정한다. 규정된 각 주파수에서 크기와 위상 두 가지를 측정한다.

3.2.1. 측정 결과

와전류검사 장치의 출력 임피던스는 50 ohms 이다. 와전류검사 장치의 주파수와 레벨을 시험하고자 하는 값으로 설정하고, 임피던스 분석기(HP-4192A)로 시험주파수의 레벨을 측정하였으며 측정 결과를 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Input & output impedance

Probe Drive Signal Voltage:12Vpp	1kHz	47Ω
	50kHz	47Ω
	100kHz	47Ω
	200kHz	47Ω
	300kHz	47Ω
	400kHz	47Ω
	500kHz	47Ω
	600kHz	47Ω
	1MHz	47Ω
	5MHz	47Ω
	10MHz	47Ω

3.3. 증폭기 직선성 및 안정성(Amplifier Linearity and Stability)

검사에 사용된 각 채널의 증폭기 직선성 및 안정성은 장치 입력에 주입된 신호와 데이터 분석 스크린에서 측정된 신호크기의 비로 측정한다. 이는 코일 측에서 감지된 와전류신호와 분석 스크린 상에서 관찰된 신호 사이의 유사성을 측정하는 것으로서 다음을 측정한다.

- 장치에서 가능한 가장 작은 이득값과 가장 큰 이득 값 사이에 동일한 간격으로 배열된 5개의 다른 이득 설정치를 측정
- 검출 가능한 가장 작은 신호와 가장 큰 신호 사이에 동일한 간격으로 배열된 각 이득 설정값으로 장치 입력에 주입되는 5개의 다른 신호를 측정

직선성은 그래프로 플롯시 해당 입력과 출력값 사이의 최적 선형관계로부터 벗어난 백분율 편차로 표현한다. 백분율은 직선으로부터의 최대편차를 full-scale 값으로 나누어 결정한다. 이것을 필수변수로 사용할 경우, 직선성/안정성을 최소요건으로 표현한다[1,2].

3.3.1. 측정 결과

200 kHz에서 5가지의 다른 이득(23, 30, 38, 46 및 53 dB)을 사용하여 증폭기 직선성을 측정하였으며, 모든 8개의 장치 입력을 측정하였다. 직선성의 최대 편차 백분율은 모든 입력에 대해 $\pm 0.205\%$ 로 측정되었으며 측정 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3 Measured amplifier linearity and stability

3.4. 위상 직선성(Phase Linearity)

검사에 사용되는 각 채널의 위상 직선성은 최적화 및 측정된 실제 데이터로부터 벌어난 최대 위상각 편차로 측정하여 그래프로 나타내며 측정은 다음과 같은 순서로 이루어진다[1].

- 해당 와전류 주파수에서 검사에 사용되는 각 채널의 입력으로 1개의 신호를 주입한다.
- 신호 증폭이 포화되지 않고 최대진폭에 근접하는 출력을 생성하도록 조정한다.
- 출력의 위상각을 측정한다. 입력의 위상각은 0°부터 360°까지 동일 간격으로 퍼져있는 최소 16개의 다른 값으로 변환한다.
- 수직축 상의 출력 위상각과 신호입력의 위상각의 그래프를 플롯한다. 1 degree/degree의 기울기를 가진 선형 최적화 선이 생성된다.
- 검사에 사용되는 각 채널에 대한 한 개의 위상 직선성 곡선과 최적화 선도가 생성된다.
- 위상 직선성은 출력위상 측정과 최적화 선도로 부터 최대 각도 편차로 표현한다. 이것이 필수 변수로 사용될 경우에는 유지되는 최대 위상 직선성 편차를 나타낸다.

3.4.1. 측정 결과

위상 직선성은 EPRI S/G Exam. Guideline Rev.7에 새롭게 추가된 시험이다. 이것의 총 위상회전을 1/208 단계별로 기준회전과 비교하였다. 위상오차를 위해서 완전한 위상회전에 대해 16개의 동일한 간격을 가진 17개의 샘플을 수집하여 기준각도와 비교하였다. 실제 및 기준점을 아래의 Fig. 4(위상 직선성)에 플롯하였다. 최대 편차는 기준으로부터 $\pm 0.58^\circ$ 이다. 와전류검사 신호수

Fig. 4 Measured phase linearity

집장치의 경우, 아래 그림에서와 같이 최적곡선의 직선 형태를 보이며 오차는 대체적으로 1° 이내의 값을 보이나 최대 에러는 2.3° 이내로 측정되었다.

3.5. 대역폭 및 복조필터 응답(Bandwidth and Demodulation Filter Response)

검사에 사용되는 각 채널의 대역폭은 복조필터 진폭 주파수 응답이 최대합격편차에 도달할 때의 주파수를 측정하며, 측정은 다음과 같이 이루어진다[3,4].

- 한 개 신호를 검사에 사용되는 각 입력에 주입한다.
- 신호 주파수를 해당 채널의 와전류 주파수로 조정한다.
- 포화되지 않고 최대 출력 범위에 근접하도록 신호 진폭을 조정한다.
- 주입되는 주파수에 해당하는 각 채널에 대해 출력 진폭을 측정한다.
- 대역폭의 5%보다 작은 단계로 입력 주파수를 증가시키면서 해당 출력 진폭을 측정한다.
- 위 측정에 대해 각 채널의 그래프를 플롯한다. 수직축은 주입되는 각 주파수의 신호 진폭을 해당 와전류 주파수에서 신호진폭으로 나눈 비로 표현한다.
- 대역폭(bandwidth)은 그래프상의 비가 합격 범위를 벗어나는 곳에서의 값을 Hertz로 나타낸다. 예를 들어, 합격 범위는 $100\% \pm 2\%$ 가 될 수 있다. 대역폭이 필수변수로 사용될 때에 대역폭은 최소 대역폭 주파수로 표현된다.

3.5.1. 측정결과

대역폭 및 복조필터 응답은 EPRI Rev.7에 새롭게 추가된 시험으로서 측정은 20 kHz 주입 주파수를 사용하여 +10 Hz 증분단계로 수행하였으며, 8개 각 입력에 대해 전압응답을 측정하였다.

15.91 Volts의 침투전압으로부터 -3 dB 낮은 지점의 해당 주파수는 20.20 kHz이며, MIZ-80iD 장치의 총 대역폭 및 복조필터응답은 -3 dB에서 400 Hz가 된다. 동일한 절차에 의해 와전류검사 신호수집장치의 대역폭 및 복조필터 응답을 측정하였다. 측정은 100 kHz의 주입 주파수를 사용하여 50 Hz 증분단계로 수행하였다. 6.5 Volts의 침

두전압으로부터 -3 dB 낮은 지점의 해당주파수는 109.5 kHz이고 와전류검사 장치의 총 대역폭 및 복조필터응답은 -3 dB에서 9.5 kHz로서 측정 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

3.6. 디지털 변환(A/D Conversion)

디지털 변환의 분해능은 1 bit 변화에 해당하는 입력 전압의 값이다. 디지털 변환 후에 관찰되는 와전류신호의 가장 작은 변화를 측정하는 것이다. 장치에서 가능한 한 가장 작고 가장 큰 값 사이에 동등한 간격으로 배치된 5개의 이득 설정치에 대해 측정한다. 이것이 필수변수로 사용될 경우에는 디지털 변환의 분해능은 최소값으로 표현된다. 디지털화 속도는 A/D 변환이 이루어지는 곳에서 Hertz(Hz)단위의 주파수이다. A/D 변환의 최소 디지털화 속도는 사용되는 탐촉자 속도에서 규정된 샘플속도(sample rate)를 제공하는 능력을 갖는 것이 좋다. 이것이 필수변수로 사용될 경우에는 최소 디지털화 속도를 규정한다[1,2].

3.6.1. 측정 결과

A/D 변환은 디지털 데이터의 1 bit 변화에 해당되는 입력신호 전압에서 최대 변화를 정의하도록 측정하였다. 와전류검사 장치는 16 bit A/D 변환기를 사용한다. 이것은 A/D 변환기의 1 bit 변화에 대해 $305 \mu V_{dc}$ 의 와전류가 검출된다. 이는 와전류검사 장치의 채널에 $20 V_{pp}$ 의 신호가 최종 수집된 신호일 때를 가정한 것이며, 게인 설정에 따른 분해능의 변화는 아래 Fig. 6에서와 같이 로그함수에 비례하여 선형적임을 확인하였다.

3.7. 채널간섭(Channel Crosstalk)

채널간섭은 해당 입력(다른 입력에 존재하는 신호로부터 발생하는)에 신호가 존재하지 않을 때 채널 출력에 잔류하는 신호를 측정하며, 측정은 다음과 같이 이루어진다[3,4].

- 이득은 장치 범위의 최소값으로 설정한다.
- 검사를 위해 사용되는 각 입력으로 하나의 신호를 주입한다. 이것은 한 번에 한 개 채널에 적용한다.
- 신호 주파수를 해당 채널의 와전류 주파수로

Fig. 5 Measured bandwidth and demodulation filter response

Fig. 6 Measured A/D conversion rate

조정한다.

- 신호 진폭을 포화되지 않은 상태로 최대 출력 범위에 근접하게 조정한다.
- 각각의 다른 채널 출력에서 출력 진폭을 측정한다.
- 혼선은 신호 입력이 없는 채널의 출력 진폭을 신호가 입력으로 주입되는 해당 채널의 출력 진폭으로 나눈 비의 백분율로 표현한다. 채널 혼선이 필수변수로 사용될 경우에는 혼선의 최대 백분율로 나타낸다.

3.7.1. 측정 결과

채널간섭의 측정은 호칭 $18 V_{pp}$ 신호를 검사 장치의 한개 입력으로 주입시켜 수행되며, 7개의 다른 각각의 입력채널에 존재하는 신호를 측정한다. 이 절차는 8개 입력에서 순차적으로 수행되며, 각 채널의 침투값을 기록하여 총 주입전압의 백분율로 아래 그래프에 나타낸다. 시험 결과, 신호수집장치의 모든 채널에 대한 최대 채널간섭은 입력전압에 대해 0.56% 로 측정되었으며 이를 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7 Measured channel crosstalk

4. 결 론

본 논문에서는 한국수력원자력(주)에서 개발한 증기발생기 와전류검사 장치의 ASME 코드 요건에 따른 전기적 특성 측정 조건과 이에 따른 측정 결과를 기술하였다. 와전류검사 장치의 측정 결과를 분석한 결과 ASME 코드에서 요구된 요건을 충분하게 만족하는 것으로 평가되었다.

향후 현장 시운전과 적용검사를 통해 개선사항을 보완하여 최적의 한국형 시스템을 완성함으로써 현재까지 외국사에 의존해온 와전류검사 기술의 완전 자립을 달성할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] ASME B&PV Code Sec. V(Nondestructive Examination), 2010 Edition Article 8, "Eddy current examination of nonferromagnetic heat exchanger tubing"
- [2] KEPIC MEN A8, "Eddy current examination," App. II "Eddy current exam. of nonferromagnetic heat exchanger tubing"
- [3] ASME B&PV Code Sec. XI(Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant), 2010 Edition App. IV, "Eddy current examination"
- [4] KEPIC MI(Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant), App. IV, "Eddy current examination"
- [5] EPRI SGMP, "Pressurized water reactor steam generator examination guidelines," Revision 7, EPRI-TR 1013706, 2007
- [6] H. J. Lee, M. W. Nam, C. H. Cho, Y. S. Kim, B. S. Yoon, H. J. Yoo, G. Y. Moon, I. C. Kim, G. Y. Chon and T. H. Lee, "Development of steam generator eddy current testing system for nuclear power plant," Midterm Report, KHNP CRI(2012. 4)