

APR1400 원자로 내부구조물 종합진동평가프로그램용 측정센서 검토

A Review of Measuring Sensors for Reactor Vessel Internals Comprehensive Vibration Assessment Program in Advanced Power Reactor 1400

고 도 영† · 이 재 곤*

Do-Young Ko and Jae-Gon Lee

(2010년 11월 9일 접수 ; 2010년 12월 8일 심사완료)

Key Words : RVI(원자로 내부구조물), CVAP(종합진동평가프로그램), APR1400(신형경수로1400), Measuring Sensor(측정센서)

ABSTRACT

Reactor vessel internals comprehensive vibration assessment program(RVI CVAP) is one of the necessary tests to ensure the safety of nuclear power plants. RVI CVAP of U.S. nuclear regulatory commission regulatory guide 1.20(U.S. NRC R.G. 1.20) consists of the analysis, measurement and inspection. One of the core technologies of the measurement program for RVI CVAP is to select suitable sensors because the measurement is conducted during the critical path of the construction period of nuclear power plants. Therefore, we analyzed RVI thermal-hydraulic and structure design data of Palo Verde nuclear power plant(U.S.), Yonggwang nuclear power plant(Korea) and APR1400 and researched measuring sensors used in them; moreover, we investigated sensors used for measurement of RVI CVAP for the last 20 years throughout the world. Based on these results, we selected suitable measuring sensors for RVI CVAP in advanced power reactor 1400(APR1400).

1. 서 론

신형경수로 1400(APR1400 : advanced power reactor 1400)은 국내 기술로 개발한 전기출력 1,400 MWe의 신형 가압경수로(PWR : pressurized water reactor)이다. APR1400은 한국표준형원전(OPR 1000 : optimized power reactor 1000)의 설계, 건설, 운영

및 정비를 통해 축적된 경험과 기술을 기반으로 신 개념 기술을 도입하여 안전성, 경제성, 운전 및 정비 편의성을 향상시켰다⁽¹⁾. 2009년 12월 27일, 우리나라가 역대 최대 해외수주 규모(400억달러)로 UAE에 수출하기로 계약한 원전이 바로 APR1400이다.

미국 연방법 10 CFR(code of federal regulations) part 50은 원전의 일반설계기준(GDC : general design criterion)을 포함하고 있으며, GDC는 원전사업자가 안전성을 확보하기 위해 원전의 중요한 구조물, 시스템 그리고 기기의 설계 및 성능에 대한 평가를 수행하도록 명시하고 있다⁽²⁾.

원자력발전소 구성기기 중 가장 중요한 원자로

† 교신저자; 정회원, 한국수력원자력(주) 원자력발전기술원
E-mail : kodoyoung@khnp.co.kr

Tel : (042)870-5774, Fax : (042)870-5779

* 한국수력원자력(주) 원자력발전기술원

이 논문의 일부는 2010년 추계 소음진동 학술대회에서 발표되었음.

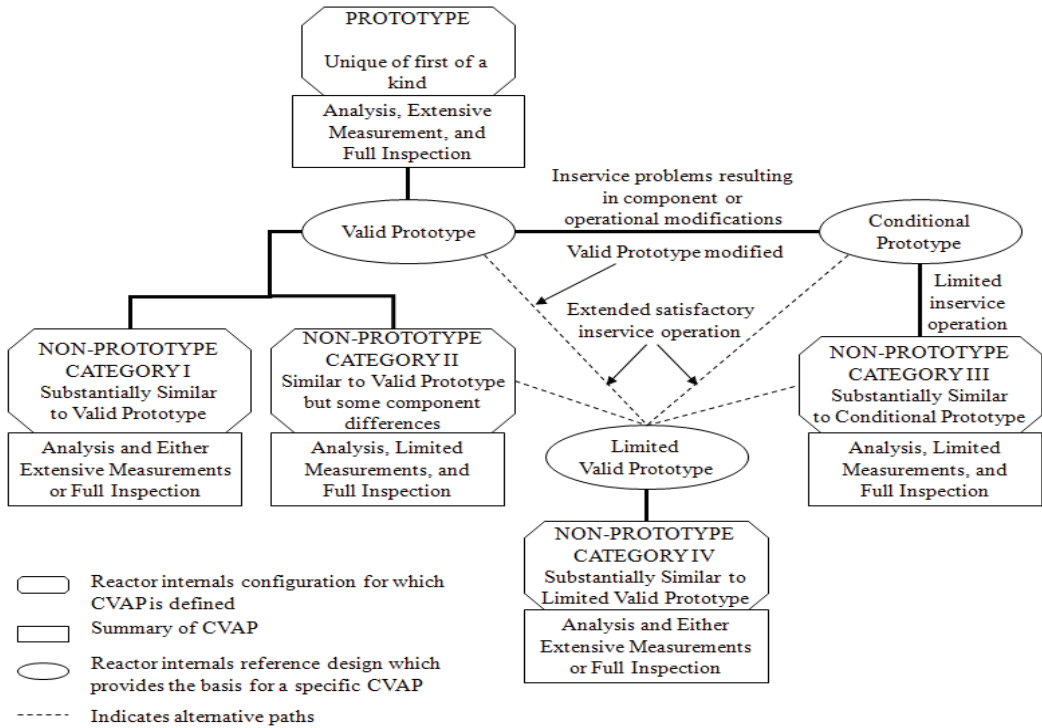


Fig. 1 Summary of RVI CVAP

(RV : reactor vessel)가 운전기간 중 유동유발진동 (flow induced vibration)에 구조적으로 견뎌내지 않을 것을 확인하고 안전 여유도를 확보하기 위해 제정된 것이 미국원자력규제위원회의 규제지침 1.20 comprehensive vibration assessment program for reactor internals during preoperational and initial startup testing이다. U.S. NRC R.G. 1.20은 원자로 내부구조물의 배열(arrangement), 설계(design), 크기(size) 및 운전조건(operating conditions)이 유효원형(valid prototype) 발전소와 본질적 동일성 정도에 따라 해당 원전의 원자로 내부구조물 종합진동평가(RVI CVAP : reactor vessel internals comprehensive vibration assessment program) 방법을 결정하도록 Fig. 1과 같이 분류 및 요약하고 있다.

한국표준형원전(OPR1000) 및 신형경수로 1400 (APR 1400) 원전의 설계 원형은 system 80형이다. 미국 Palo Verde 1호기 원전은 system 80형 원전으로 건설된 최초 원전이었으므로, Fig. 1의 RVI CVAP 요약표에 따라 RVI CVAP를 prototype(해석, 광범위한 측정, 전체검사)으로 프로그램을 수행하였다. 또한, 한국표준형원전(OPR1000)의 최초 건

설 원전인 영광 3, 4호기 건설시 영광 4호기는 Palo Verde 1호기 원전의 prototype 프로그램 수행을 근거로 non-prototype category II(해석, 제한적 측정, 전체검사)로 수행된 바 있어, 국내에서 RVI CVAP의 측정프로그램이 최초로 수행된 것은 1995년이다. 이후 국내 원전은 OPR1000 원전의 반복 건설로 non-prototype category I으로 측정을 제외한 해석 및 전체검사만을 수행해 왔다⁽³⁻⁶⁾. 그러므로 영광 4호기 원전 이후 국내에서는 RVI CVAP의 측정을 수행한 경험이 없다. 또한, 영광 4호기에서 RVI CVAP의 측정프로그램 수행시 해외기관인 CE사(Combustion Engineering Inc.)에 의해 수행되었으므로 국내에 관련기술이 부족한 실정이다.

현재 건설 중인 신고리 3, 4호기는 APR1400의 최초 건설 원전이다. APR1400은 CE사에서 개발한 system 80의 최초 건설 원전인 Palo Verde 1호기와 유사하나 APR1400의 해외수출 및 신규 원전개발시 CVAP를 위한 기술확보 그리고 철저한 원전사업자의 자체 독립검증을 위해서, 신고리 4호기에서 국내 독자적으로 측정을 수행하기 위한 기술을 개발 중이다⁽⁷⁻⁹⁾.

RVI CVAP는 연구의 목적이 아닌 실제 원전 건설의 필수시험 중 하나이다. 특히, 측정은 원전 건설의 주공정(critical path)에 포함되기 때문에 측정센서를 비롯한 기기 및 시스템의 장애로 측정이 되지 않으면, 사실상 재측정이 불가능하다. 따라서 적합한 측정센서의 선정에서부터 측정시스템 구축 및 작동성 시험, 시험절차서 작성, 측정용 구조물(측정용 케이블 도관, 측정센서 커버 등)의 설계/제작 및 영향 평가, 측정용 구조물의 설치 및 제거 등 몇 년에 걸친 매우 철저한 사전준비가 필수적이다. 이러한 RVI CVAP 측정프로그램의 사전준비의 일환으로, 이 논문은 APR1400 원전(신고리 4호기) RVI CVAP 측정시스템의 핵심기기인 측정센서에 대해 다양한 연구조사를 수행하였고 그 결과를 바탕으로 적합한 센서를 제안하고자 한다.

2. RVI CVAP 측정 환경분석 및 센서 구비요건

이 장에서는 APR1400 원전의 열수력(thermal-hydraulic) 및 구조(structure) 설계에 근거하여 RVI CVAP 측정환경 및 센서 구비요건에 대하여 제시하였다.

2.1 RVI 설계 분석

원자로 내부구조물 진동측정 환경을 살펴보기 위해 APR1400 RVI 열수력 설계를 분석하였다⁽¹⁰⁻¹⁴⁾.

Table 1은 RVI CVAP 센서의 측정환경 도출과 관련된 APR1400 원전의 RVI 열수력 자료를 나타낸 것이다.

APR1400 원전의 원자로 내부 운전압력은 2250 psi(158.2 kgf/cm²)이고 설계 운전온도는 555 °F(290.6 °C)이다⁽¹⁰⁾. RVI CVAP 수력하중(hydraulic forcing function)은 펌프맥동(pump pulsation)에 의한 주기적(deterministic) 하중, 유체난류(turbulence)에 의한 불규칙적(random) 하중이 발생한다. 펌프맥동은 본질적으로 음향(acoustic) 하중으로 원자로 냉각재 펌프 회전수(1200 rpm)와 원자로 냉각재 펌프 blade passing frequency(120 Hz)의 배수에서 발생한다. APR1400 원자로 냉각재 펌프는 4대 이므로 20 Hz ~ 480 Hz에서 측정 가능한 센서가 선정되어야 할 것으로 검토되었다.

Table 1 RVI thermal-hydraulic design for APR1400

Item	Specification
RV operating pressure(psia)	2250
Operating temp.(°F)	555
Pump rotor speed(rpm)	1190
Reactor coolant pump speed(rpm)	1200(20 Hz)
Reactor coolant pump frequency blade passing frequency(Hz)	120

Table 2 RVI structure design for APR1400

Component		Specification
CSB	Length	9715.5 mm
	Diameter	3987.8 mm
UGS	Length	4924.4 mm
	Diameter	3962.4 mm

* CSB : core support barrel, UGS : upper guide structure

또한, 측정센서 케이블 길이 등을 도출하기 위해 APR1400 RVI 구조 설계를 분석하였다⁽¹⁰⁻¹⁴⁾. Table 2는 RVI CVAP 센서의 측정환경 도출과 관련된 APR1400 원전의 RVI 구조 설계를 나타낸 것이다. RVI의 노심지지통(CSB : core support barrel)의 길이가 약 9.7 m 정도이므로 센서가 설치되는 원자로 내부에서부터 원자로 외부까지의 고온 및 고압에 견딜 수 있는 하드케이블은 라우팅 길이를 감안하여 최소 20 m 이상 되어야 할 것이다. 또한, 하드케이블이 끝나는 원자로 외부에서부터 측정실의 신호 증폭기까지 연결할 소프트케이블은 최소 30 m 이상 되어야 할 것으로 검토되었다.

2.2 RVI CVAP 측정구조물 선정

OPR1000은 영광 4호기 원전에서 신고리 4호기 원전과 동일하게 non-prototype category II로 RVI CVAP를 수행하였다. 원형 원전인 Palo Verde 1호기에서는 해석, 광범위한 측정, 전체검사를 수행해야 했으므로, RVI의 주요 구성요소인 노심지지통(CSB), 상부안내구조물(UGS), 하부지지구조물(LSS : lower support structure)에 대해 모두 측정을 수행하였다. 그러나 영광 4호기 원전에서는 non-prototype category II로 수행함에 따라 해석과 전체검사 그리고 CSB와 UGS에 한하여 제한된 측정(LSS 제외)을 수행하였다.

Table 3 Sensors for CVAP in Palo Verde unit 1

Sensors \ Position	CSB	UGS	LSS	Sum
Pressure transducer	9	3	1	13
Accelerometer	1	6	1	8
Strain gage	8	4	2	14
Displacement transducer	3			3
Sum	21	13	4	38

Table 4 Sensors for CVAP in Yonggwang unit 4

Sensors \ Position	CSB	UGS	LSS	Sum
Pressure transducer		8	-	8
Accelerometer	2	4	-	6
Strain gage	4	12	-	16
Sum	6	24	-	30

Palo Verde 1호기와 영광 4호기 RVI CVAP 측정프로그램에 사용된 측정센서의 종류, 수량, 부착 위치를 각각 Table 3과 Table 4에 나타내었다.

신고리 4호기는 Palo Verde 1호기와 영광 4호기 대비 RVI 구성요소 중 UGS만 설계 변경이 되었으므로, UGS를 중심으로 자체 설계검증 및 기술 확보를 위해 제한된 측정을 수행하는 것이 바람직한 것으로 검토되었다. 또한, 영광 4호기(OPR1000) RVI CVAP 측정자료와 원형 원전인 Palo Verde 1호기 측정자료를 검토한 결과, UGS의 측정위치는 현재 진행 중인 유동 및 구조해석 결과와 측정 후 측정용 구조물 제거 가능 유무 등을 고려한 측정위치 선정기준이 수립된 이후에 최종 결정하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

2.3 RVI CVAP 측정센서 구비요건

APR1400 RVI 설계 분석결과 및 과거 RVI CVAP 측정사례 등에 근거하여 APR1400 RVI CVAP 측정센서는 다음과 같은 조건을 만족하여야 할 것이다.

첫째, 측정센서는 원자로 내부 운전 설계온도 290.6 °C(555 °F), 원자로 내부 운전 설계압력 158.2 kgf/cm²(2250 psi)와 열유동 환경에 견딜 수 있어야 한다. 둘째, 측정센서는 원자로 내부에 설치하고, 센서의 신호증폭 및 신호변환기는 원자로 외부에 설

치할 수 있는 분리형태가 되어야 한다. 셋째, 측정케이블 중에서 원자로 내부에 설치되는 하드케이블은 고온 및 고압 환경에 견딜 수 있는 특수케이블(MI cable : mineral insulated cable)로 구성되어야 한다. 넷째, 원자로 냉각재 유동으로 인한 유동가진 음파공진(flow-excited acoustic resonances) 및 유동 유발진동에 의한 잠재적인 부정적 효과(potential adverse flow effects)에 대한 압력 및 진동의 크기는 매우 작으므로 감도는 매우 중요하다. 따라서 측정센서의 감도는 과거 RVI CVAP 측정에 성공한 측정센서를 참고하여 선정하는 것이 타당한 것으로 판단된다. 이 논문에서는 영광 4호기 RVI CVAP 측정시 사용된 측정센서의 감도를 적용하여 압력계는 232 pC/bar, 가속도계는 5 pC/g로 하였고, 변형률계는 감도를 나타내는 기준이 없고 유사한 개념으로 gage factor를 사용하는 것으로 조사되어 제외하였다. 다섯째, 측정센서의 주파수 응답 요건을 선정하기 위해 낮은 주파수는 RVI 구성요소의 고유진동수를 적용하여 산출하고, 높은 주파수는 주기적 가진 주파수를 적용하여 산출하여야 한다. 따라서, 낮은 주파수는 RVI 구성요소 중 고유진동수가 가장 낮은 CSB를 해석한 결과 7.2 Hz로 파악되었다. 높은 주파수는 원자로냉각재펌프 blade passing frequency가 120 Hz이며 4대 이므로 480 Hz 이상 측정 가능한 센서가 선정되어야 할 것으로 판단된다. 여섯째, 측정센서의 불량률 및 파손율이 고려되어야 한다. RVI CVAP에 사용되는 센서는 고온 및 고압에서도 안정적인 측정이 가능한 것으로 선정되어야 한다. 과거 해외 측정사례(예, 미국 Palo Verde 1호기 원전 RVI CVAP)에서 고온 및 고압 환경으로 인해 작동불능 된 경우가 있었던 것으로 알려져 있다. 그러나 일반적으로 시스템(측정센서 포함)의 안정성을 나타내는 평균무고장시간(MTBF : mean time between failure) 또는 기기의 수명에 대한 기준이 제시된 코드나 지침은 없는 것으로 알려져 있다. 그러므로 이 논문에서는 과거 RVI CVAP에 성공적으로 사용된 측정센서를 고려하는 것으로 안정성을 확보하였다. 일곱째, 측정센서 선정시 가격도 고려의 대상이 되어야 하나, RVI CVAP의 측정은 원전 건설 주공정의 주어진 기간내에 성공적으로 완료되어야 하므로 이 논문에서는 측정센서의 가격은 크게 고려하지 않았다.

Table 5 Requirements of sensors for APR 1400 RVI CVAP

Item	Specification
Operational temp.	290.6 °C or more
Frequency	2 ~ 480 Hz or more
Operational pressure	158.2 kgf/cm ² or more
Sensitivity (pressure transducer/ accelerometer)	232 pC/bar, 5 pC/g
Hard cable	MI Cable (20 m or more)
Soft cable	30 m or more

마지막으로 원자로 내부의 하드케이블과 외부의 소프트케이블은 RVI 구조를 감안할 때 각각 최소 20m와 30m 이상 되어야 한다.

이상에서 제시한 측정센서의 구비요건을 정리하여 Table 5와 같이 APR1400 RVI CVAP을 위한 측정센서의 기본 요건을 정리하였다.

3. 측정센서의 종류 및 특성

이 장은 APR1400 원전의 원형인 Palo Verde 1 호기와 OPR1000 원전인 영광 4호기 원전 RVI CVAP에 사용된 측정센서에 대한 조사와 최근 사용된 실적이 있는 RVI CVAP 측정센서를 비교분석하였다.

3.1 RVI CVAP이 수행된 원전의 측정센서

APR1400의 RVI CVAP 측정프로그램에 적용할 측정센서 선정을 위하여 APR1400 원전의 핵증기공급계통(NSSS : nuclear steam supply system) 설계부터 검토해야 한다. APR1400은 가압경수로형(PWR) 원전으로써 미국 CE사의 system 80 원자로 설계에 기반하며, 우리나라의 OPR1000 원자로 설계를 개량한 원전이다. 그러므로 system 80의 원형(prototype) 원전인 미국의 Palo Verde 원전에서 RVI CVAP 측정프로그램을 수행한 1호기 원전과 OPR1000 RVI CVAP 측정프로그램을 수행한 영광 4호기 원전에서 사용된 측정센서에 대하여 각각 조사하였다.

(1) 압력계

1983년 Palo Verde 1호기 원전에 사용된 RVI

CVAP 압력계는 동적 응답형인 Columbia Research Lab. No. 774와 정적 및 동적 응답형인 Kaman Sciences Model KP-1911의 2종류가 사용되었다⁽¹⁵⁾.

1995년 영광 4호기 원전에 사용된 RVI CVAP 압력계는 동적응답형으로 Vibro-Meter사의 CP103이 사용되었다. 측정센서가 설치된 원자로 내부로부터 원자로 외부까지 사용된 하드케이블은 RVI 구조 및 원자로 내부 운전온도와 운전압력을 반영한 MI케이블이 50 ft(15.24 m)가 사용되었다⁽¹⁶⁾.

(2) 가속도계

Palo Verde 1호기 원전에 사용된 RVI CVAP 가속도계는 2축 가속도계(biaxial) 및 3축 가속도계(triaxial)로 Columbia Research Lab. No. 775와 No. 776이 사용되었고⁽¹⁵⁾, 영광 4호기 원전에 사용된 RVI CVAP 가속도계는 2축 가속도계로 Vibro-Meter사의 CA602 사용되었다⁽¹⁶⁾.

(3) 변형률계

Palo Verde 1호기 원전에 사용된 RVI CVAP 변형률계는 용접 가능한 고온용 응력계로 Ailtech사의 Micro-dot가 사용되었고⁽¹⁵⁾, 영광 4호기 원전에 사용된 RVI CVAP 변형률계는 용접 가능한 고온용 변형률계로 KYOWA사의 KHC-20-120-G8-16이 사용되었다⁽¹⁶⁾. 여기서 KHC는 Kyowa사의 캡슐형 용접/고온형 변형률계, 20은 변형률계 길이 20 mm, 120은 변형률계 저항, G8은 변형률계 케이스(sheath) 및 테두리(flange)의 재료가 inconel 600, 16은 스테인레스 스틸임을 의미한다.

3.2 최근 사용된 측정센서의 비교분석

APR1400 RVI CVAP 측정센서를 도출하기 위해 1990년부터 최근까지 약 20년간 전 세계 원전에서 RVI CVAP 측정을 위해 사용된 센서를 조사하였다. 조사된 국가는 미국, 프랑스, 일본, 캐나다, 중국 등 총 13개국이며, 신규 원전 건설 또는 기존 원전의 출력증강을 위해 PWR 노형과 BWR(boiled water reactor) 노형에 사용된 센서들을 모두 조사한 후, 다시 APR1400 원자로 형태인 PWR 노형의 RVI CVAP 환경에서 사용된 측정센서를 정리하였다.

첫째, 압력계로 가장 많이 사용된 센서로는 Vibro-Meter사의 압전형(piezoelectric) 압력계 CP104,

Table 6 Comparison of pressure transducers for RVI CVAP used in PWR

Press. trans.	Max. temp. (°C)	Max. press. (kgf/cm ²)	Frequency response (Hz)	Remark
CP104	400	101.9	2~6,000	- (A)BWR - 190 pC/bar, 150 g - SG flow induced vibration
CP211	777	356.9	2~15,000	- Meets NRC guide 1.20 - 25 pC/bar, 12 g - Compact size
CP103	700	254.9	2~10,000	- Meets NRC guide 1.20 - 232 pC/bar, 120 g - RVI startup testing and HFT

* SG : steam generator, HFT : hot functional test

CP211 그리고 CP103으로 조사되었다.

Table 6은 최근 전 세계적으로 PWR 노형의 원전에서 CVAP를 위해 가장 많이 사용한 압력계 3종에 대한 비교표이다⁽¹⁷⁾.

Table 6에서 보는 바와 같이, CP104는 최대 압력이 100 bar(101.9 kgf/cm²)로 BWR 노형에서는 사용이 가능하나, 최대 압력이 최소 155 bar(158 kgf/cm²) 이상 필요한 PWR 노형에서는 부적합함을 알 수 있었다.

CP211은 온도, 압력, 주파수 응답특성을 모두 만족하고 크기와 무게가 작을 뿐 아니라 U.S NRC guide 1.20⁽²⁾도 만족하여 적합한 센서로 판단된다. 그러나 감도가 25 pC/bar로 다른 압력계에 비해 상대적으로 다소 큰 동적 압력변화를 측정할 때 더 적합한 것으로 검토되었다. CP103은 온도, 압력, 주파수 응답특성을 모두 만족하고 U.S NRC guide 1.20도 만족하여 적합한 센서로 판단된다. 감도가 232 pC/bar로 CP211에 비해 상대적으로 미세한 동적 압력변화를 측정할 때 더 적합한 것으로 검토되었고, RVI의 초기시험과 출력상승시험 등 시운전시 특히 많이 사용되었다. 그러므로 CP211과 CP103 모두 APR1400 RVI CVAP의 측정센서로 선정될 수 있다. 그러나 이 논문에서는 원자로 시운전 기간 중 미세한 동적 압력변화도 측정 가능한 CP103을 적용하는 것이 더 타당할 것으로 판단되어 이를 제안하고자 한다.

둘째, 가속도계는 Vibro-Meter사의 압전형 가속도계 CA602, CA952, CA962 그리고 CA606이 가장

Table 7 Comparison of accelerometers for RVI CVAP used in PWR

Accel.	Max. temp (°C)	Max. pressure (kgf/cm ²)	Frequency response (Hz)	Remark
CA606	780	168.2	5 ~ 300	- 2 pC/g, 7.7 g - Miniature biaxial
CA602	650	168.2	2 ~ 700	- Will meet NRC guide 1.20 - RVI startup testing and HFT - 5 pC/g, 30 g - Biaxial
CA952/CA962	650	254.9	2~2,500/ 2~400	- Will meet NRC guide 1.20 - RVI startup testing and HFT - 50 pC/g, 450 g / 250 pC/g, 450 g

많이 사용된 것으로 조사되었다.

Table 7은 최근 전 세계적으로 PWR 노형의 원전에서 CVAP를 위해 가장 많이 사용한 가속도계 4종에 대한 비교표이다⁽¹⁷⁾.

Table 7에서 보는 바와 같이, CA606은 최대 주파수 응답이 300 Hz, 감도가 2 pC/g로 앞에서 제시한 측정센서 구비요건 중 주파수 응답(2~480 Hz 이상)과 감도(5 pC/g) 기준을 만족하지 못하므로 부적합함을 알 수 있다. CA602는 온도, 압력, 주파수 응답특성을 모두 만족하고 U.S NRC guide 1.20도 만족한다. 특히, 2축 가속도계이므로 측정센서의 수량을 감소시킬 수 있다. 감도가 5 pC/g로 앞에서 제시한 측정센서 구비조건은 만족하나, CA952/CA962에 비해 감도가 좋지 못한 단점이 있다. CA602는 튜브내와 같은 협소한 설치장소에 설치되어 이동하면서 측정이 가능한 곳에 사용하는 것이 본래의 목적이므로 외형의 특성상 측정감도가 좋지 못하다. 국내 영광 4호기 원전의 RVI CVAP 측정용 가속도계로 CA602를 사용한 실적이 있으나, 최근 핀란드에 건설한 Olkiluoto 3호기를 비롯하여 전 세계적으로 RVI CVAP의 가속도계로 CA952/CA962를 더 많이 사용되고 있다. CA952는 온도, 압력, 주파수 응답특성을 모두 만족하고 U.S NRC guide 1.20도 만족한다. 크기와 무게가 CA602에 상대적으로 크지만, 측정대상이 원자로 내부구조물이기 때문에 무게가 수십 톤이며, 측정위치에 설치 및 제거도 가능한 것으로 검토되어 CA952의 크기와 무게는 문제가 되지 않음을 알 수 있다. 특히, 감도가 50 pC/g로

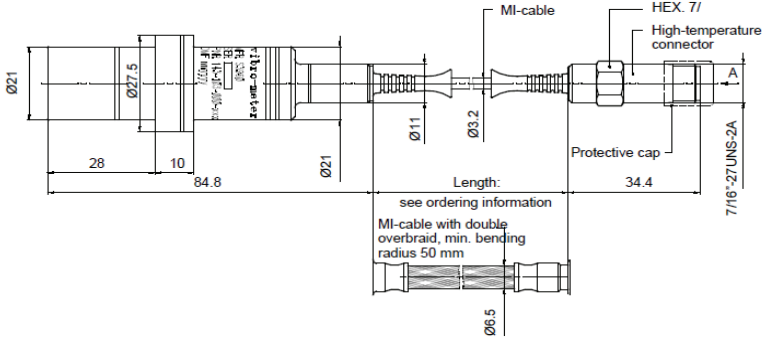


Fig. 2 Proposed pressure transducer for RVI CVAP in APR1400

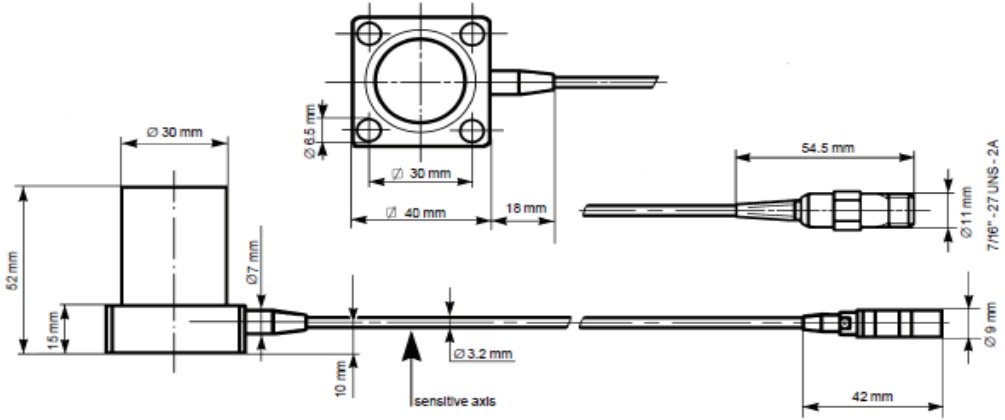


Fig. 3 Proposed accelerometer for RVI CVAP in APR1400

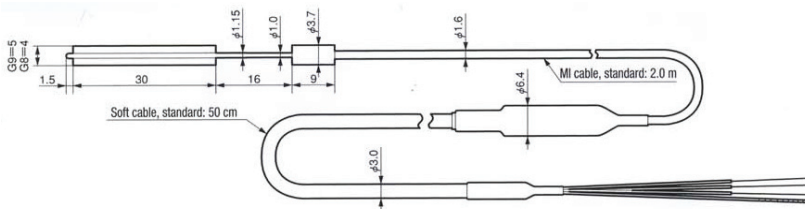


Fig. 4 Proposed strain gage for RVI CVAP in APR1400

CAP602에 비해 10배 정도 우수한 것으로 조사되어 RVI CVAP 진동 측정에 더 적합한 것으로 검토되었다. CA962는 주파수 응답특성이 480 Hz 보다 작으므로 적합하지 않은 것으로 판단된다. 그러므로 CA602와 CA952 모두 APR1400 RVI CVAP의 측정센서로 선정될 수 있다. 그러나 이 논문에서는 원자로 시운전 기간 중 미세한 진동 측정이 가능한 CA952를 적용하는 것이 더 타당할 것으로 판단되어 이를 제안하고자 한다.

셋째, 변형률계는 다양하게 사용되었으나 최근에 원전의 변형률계로 가장 많이 사용된 센서는 KYOWA사의 capsule형으로 용접이 가능한 변형률계 KHCX, KHCS, KHCM 그리고 KHC 계열이었다.

Table 8은 RVI CVAP를 위해 가장 많이 사용한 KYOWA사의 Capsule형 고온 변형률계 KHCX, KHCM, KHC 3종에 대한 비교표이다⁽¹⁸⁾.

Table 8에서 보는 바와 같이, KHC 변형률계는 최대 운영온도가 -196 °C ~ +550 °C, 주파수 응답 0 Hz ~

10,000 Hz이고 재질은 수증 측정과 부식방지를 위해 inconel 600으로 밀봉 용접되며 spot 용접으로 원자로 내부구조물에 부착된다. 신호전송은 센서 케이싱 내에 절연된 두 개의 센서 단자로부터 전송되며, 측정값의 저항값 계산을 위해 원자로 외부에 bridge adapter가 설치된다. 원자로 내부구조물의 측정센서로부터 원자로 외부의 소프트케이블 연결단자까지의 하드케이블, 연결단자부터 bridge adapter까지의 소프트케이블로 구성할 수 있다. KHC는 영광 4호기 및 최근 20년간 원전에서의 사용실적 그리고 이 논문에서 제시한 측정센서의 기본요건을 모두 만족하므로 APR1400 RVI CVAP 변형틀계로 적합함을 알 수 있다.

4. APR1400 RVI CVAP 측정센서 제안

앞에서 살펴본 APR1400 원자로 내부구조물 진동 측정 환경 및 구비조건, 국내의 원전에서의 사용 사례, 측정센서 종류별 특성 등을 감안하여 APR1400 RVI CVAP 측정센서로 가장 적절한 센서를 정리하면 Table 9와 같다.

Figs. 2, 3, 4는 각각 APR1400의 RVI CVAP 압력

Table 8 Comparison of strain gages for RVI CVAP used in PWR

Strain gage	Max. temp (°C)	Frequency response (Hz)	Remark
KHCX	950	2~10,000	- High-temp. gas-turbine dynamic/static wings - High-temp. furnace - Fatigue life : 4×10^6 times
KHCM	650	2~10,000	- Nuclear reactor peripherals - Thermal-power-plant heat exchanger - Fatigue life : 4×10^6 times
KHC	550	2~10,000	- Nuclear fuel rod - Boiler steam turbine - Fatigue life : 4×10^5 times

Table 9 Proposal of sensors for APR1400 RVI CVAP

Sensor	Manufacturer	Model name
Pressure transducer	Vibro-Meter	CP103
Accelerometer	Vibro-Meter	CA952
Strain gage	Kyowa	KHC-20-120-G8-16

계, 가속도계, 변형틀계로 제안하는 CP103, CA952, KHC-20-120-G8-16을 나타내고 있다.

5. 결 론

원자로 내부구조물 종합진동평가(RVI CVAP)는 신규 개발 원자로의 안전성과 건전성 확인을 위한 필수 시험 중 하나이다. 특히, APR1400 RVI CVAP의 측정프로그램은 원전 건설 주공정(critical path)에 해당되어 재측정이 불가능하기 때문에 반드시 성공이 보장되어야 한다. 이 논문에서는 이러한 측정프로그램의 성공을 보장하는 가장 중요한 요소 중 하나인 측정시스템의 측정센서를 선정하기 위해 Palo Verde 1호기, 영광 4호기, APR1400 원전(신고리 4호기)의 열수력 및 구조 설계 분석과 APR1400 RVI CVAP 측정구조물 선정에 관한 연구결과에 근거하여 APR1400 RVI CVAP 측정센서의 기본 요건을 제시하였다. 또한, Palo Verde 1호기와 영광 4호기 원전의 RVI CVAP 측정에 사용된 측정센서 검토와 최근 20년간 전 세계적으로 RVI CVAP를 위해 사용된 측정센서를 조사하여 비교분석 하였다. 이러한 다양한 연구결과를 바탕으로 APR1400 RVI CVAP 측정프로그램을 위한 측정센서를 제안하였다.

이 논문에서 제안한 측정센서는 최초의 APR1400 원전인 신고리 3, 4호기 원전 중 신고리 4호기 시운전 단계의 RVI CVAP 측정센서로 충분히 적용 가능할 것으로 판단되나, 유동 및 구조해석 결과를 바탕으로 최종 측정위치 등을 고려하여 결정되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

(1) Korea Hydro and Nuclear Power Co., 2001, Advanced Power Reactor 1400 Standard Safety Analysis Report.

(2) U. S. Nuclear Regulatory Committee, 2007, Regulatory Guide 1.20, Comprehensive Vibration Assessment Program for Reactor Internals during Preoperational and Initial Startup Testing, Rev. 3.

(3) Korea Electric Power Corp., 2000, Report on the Observation and Synthesis about CVAP in

KNGR RVI.

(4) Korea Electric Power Corp., 1995, Special Test Part, Collection of Experience Record for Preoperational and Initial Startup Testing for Yonggwang Generating Station Unit 3, 4.

(5) Korea Heavy Industry Co., 1995, A Comprehensive Vibration Assessment Program for Yonggwang Nuclear Generating Station Unit 4, Final Evaluation of Pre-Core Hot Functional Measurement and Inspection Program.

(6) Jung, S. H., 2005, Reactor Vessel Internals Comprehensive Vibration Assessment Program for Korea Standard Nuclear Power Plant, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No. 5, pp. 7~14.

(7) Ko, D. Y., Lee, J. G. and Kim, K. H., 2009, Vibration Measurement Plan of RVI CVAP for Shin-kori Unit 4, Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, pp. 1037~1038.

(8) Kim, K. H., Ko, D. Y. and Kim, Y.-S., 2009, Hydraulic and Structural Analysis Methodology of RVI CVAP in Shin-kori 4, Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, pp. 1113~1114.

(9) Ko, D. Y., Lee, J. G. and Kim, K. H., 2009, Preliminary Determination of Measurement Sensors and Location for RVI CVAP of Shin-kori #4, Proceedings of the Conference on Information and

Control Systems, pp. 216~217.

(10) Kepco Engineering and Construction Company Inc., 2008, Design Specification for Reactor Vessel Core Support and Internal Structures.

(11) Kepco Engineering and Construction Company Inc., 2008, Fluid System and Component Engineering Design Data for Plant Safety, Containment and Performance Analyses.

(12) Kepco Engineering and Construction Company Inc., 2008, System Description for Reactor Internals Assembly.

(13) Kepco Engineering and Construction Company Inc., 2008, Reactor Vessel Core Support and Internal Structures System Design Requirements.

(14) Kepco Engineering and Construction Company Inc., 2008, Design Data for The Hydraulic Loads on Reactor Internals During Normal Operation.

(15) Combustion Engineering Inc., 1984, A Comprehensive Vibration Assessment Program for the Prototype System 80 Reactor Internals Palo Verde Nuclear Generating Station Unit 1.

(16) Korea Institute of Nuclear Safety, 1995, Technical Review Report of Reactor Vessel Internals Comprehensive Vibration Assessment Program for Yonggwang Nuclear Power Station Unit 4.

(17) <http://www.vibro-meter.com>

(18) <http://www.kyowa-ei.co.jp>