

후쿠시마 제 1 원자력발전소 2 호기 원자로 건물 지하의 S/C Vent 관 조사영상 분석

조재완*, 정경민

*한국원자력연구원 원자력융합기술개발부

e-mail : jwcho@kaeri.re.kr

An Analysis of Investigation Movies of S/C Vent Area in the Unit 2 Reactor Building Basement floor of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant

Jai-Wan Cho * and Kyung-Min Jeong

*Dept. of Nuclear Convergence, Korea Atomic Energy Research Institute

요 약

본 논문에서는 일본의 (주) 동경전력이 공개한 후쿠시마 제 1 원자력발전소 2 호기 원자로 건물 지하에 위치한 S/C (Suppression Chamber) 주변의 Vent 관 조사 동영상들을 분석하였다. S/C 는 donut (환형) 모양의 구조물로 PCV (격납용기) 와 연결된 8 개의 Vent 관을 통해 원자로의 압력을 억제한다. 후쿠시마 사고 원자로의 용융 핵연료를 인출하기 위해서는 원자로 압력용기 및 PCV 에 물을 채워서 방사선 선량율을 떨어뜨려야 한다. 물을 채운 후에 누설이 되면 안되기 때문에, PCV 와 S/C 사이에 연결된 Vent 관에 대한 방사능 오염수의 누설지점을 찾는 것이 중요하다. 이를 위한 사전공정으로 (주) 도시바의 4 족보행 로봇 탑재 카메라를 이용하여 8 개 Vent 관 모두를 육안 검사하였다. (주) 동경전력이 공개한 영상을 분석한 결과 고선량 감마선에 의한 Speckle 들이 관측되었다. 본 논문에서는 이러한 Speckle 분포의 특성을 분석하여 S/C 와 PCV 를 연결하는 8 개 Vent 관중 방사능 오염물질이 많은 곳을 특정하고자 하였다.

1. 서론

(주) 도시바는 東京電力 福島 第一原子力発電所の 조사 및 복구작업을 위한 4 족 歩行로봇을 개발하였다 [1]. 부정지 주행 알고리즘과 다관절 구조의 설계에 의해 쓰레기 더미와 같은 장애물이 많은 험지에서 주행능력이 개선되었다. 카메라, 선량계, manipulator 를 탑재하고 있다. 또한, 협소구역 조사를 위해 카메라를 탑재한 소형 주행차를 탑재하고 있다.

東京電力은 2012 년 12 월 11 日、福島 第一 原子力発電所 2 号機 원자로 건물 지하의 压力抑制室 (S/C, suppression chamber, 이하 S/C 로 기술) 에 상기 도시바의 4 足 歩行로봇을 투입하여, 방사능 오염수의 누설지점들을 조사하였다 [2]. 格納容器 (PCV, plant containment vessel) 와 S/C 를 연결하는 8 개의 Vent 배관중 1 개 배관을 조사하였다. Vent 관 하부의 Sleeve, Sand Cushion Drain 및 Bellows Cover 하부를 조사하였으나 누수발견은 확인되지 않았다. 4 족 보행 로봇이 S/C 상부의 catwalk (Grating 이라고도 하며, 철강재를 격자모양으로 조립한 도랑 덮개)로 이동, Vent 관에 접근한다. 장착된 로봇 팔 (manipulator) 로 케이블 연결의 소형주행차를 배관 표면에 배치하여 주변을 상세히 조사하였다. 다음날에 2 번째 vent 관을 조사하기 위해 계단을 오를 때

에 로봇의 발끝이 grating 틈새에 끼어 로봇의 자세가 붕괴되어 동작 불능상태가 되었다. 이로 인해 조사가 중단되었다 [3]. 이외에도 로봇 팔의 오 동작 (2012 년 12 월 18 일, 과선회) 및 케이블 권선장치의 제어불능 (2012 년 12 월 21 일, 케이블절단에 의한 소형 주행차 포기) 등의 문제점이 발생되었다. 후쿠시마 사고원전의 “원격기술 Task Force” 산하에 “4 족 보행로봇 기술 WG(working group)” 를 설치하여 상기의 문제점 들에 대한 해결방안을 강구하였다 [4].

東京電力은 2013 년 3 월 5 일에 도시바의 4 족 보행로봇을 이용한 2 호기 원자로 건물 지하 Vent 관 하부의 주변조사를 재개하였다. 2013 년 3 월 15 일에 8 개 Vent 관 조사를 완료하였다 [5]. 그리고 조사 동영상 들을 공개하였다. 관측 동영상들에는 고선량 감마선에 의한 백색 반점(Speckle, 이하 Speckle 로 기술) 들이 다수 관측되었다. 일반적으로 CMOS 공정의 반도체 소자는 고선량 감마선에 취약하다. CMOS 공정의 ASIC, FPGA 소자로 구성되어 있는 카메라 전자회로가 보다 높은 감마선 선량율에 피폭될 수록, 카메라 영상에는 speckle 분포들이 보다 증가한다. 본 논문에서는 (주) 동경전력이 공개한 2 호기 원자로 건물 지하의 Vent 관 조사 동영상으로부터 고선량 감마선에 의한 Speckle 분포를 추출하였다. 이러한 Speckle 분포로부터 S/C

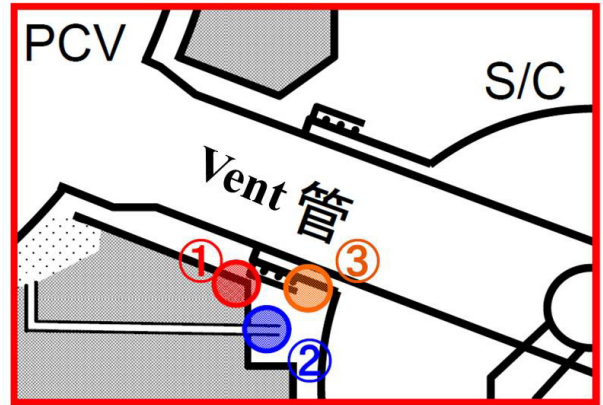
와 PCV 를 연결하는 8 개 Vent 관중 방사능 오염물질이 많은 곳을 특정하고자 하였다.

2. 2 호기 원자로 건물 S/C Vent 관 동영상 분석

그림 1 은 2 호기 원자로 건물 지하에 위치한 S/C Vent 관 검사에 사용된 4 족 보행로봇을 나타내고 있다. 표 1 에 조사결과를 나타낸다 [5].

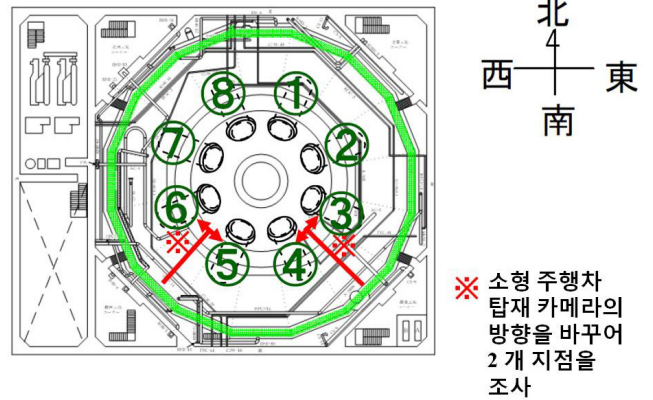


(그림 1) ㈜ 도시바의 4 족 보행로봇



- 1: Sleeve
- 2: Sand Cushion Drain
- 3: Bellows Cover

(그림 2) 2 호기 Vent 관 하부 조사위치 [5]



(그림 3) 2 호기 PCV 와 S/C 의 연결 Vent 관 [5]

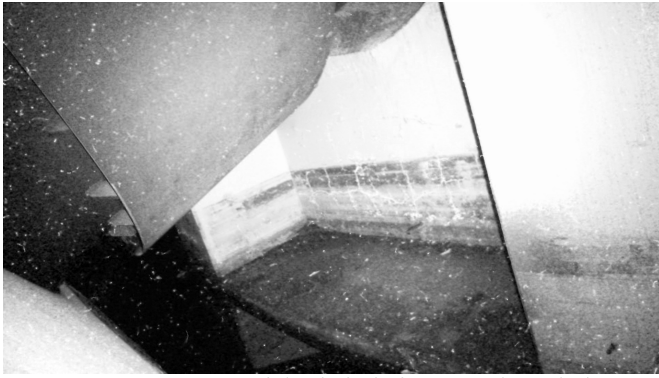
표 1 에서 0 은 그림 2, 3 에 나타낸 조사지점에서 누설이 없음을 나타내고, ⊗ 는 직접 확인되지 않으나, 콘크리트 stage 상에 유수 흔적이 없음을 나타낸다. 그림 4 는 그림 3 의 8 번 (북북서 방향) Vent 관 Sleeve 단 (그림 2 의 1 번 영역) 의 조사 영상이다. 그림이 축소되어 자세히 보이지 않으나, 적색 구조물 부위에 백색의 반점 (Speckle) 들이 보이고 있다. 이는 고선량 감마선 피폭에 의해 조사지점의 카메라 관측 영상에 나타나는 Speckle 이다. 주변의 선량이 높을수록 나타나는 Speckle 개수는 증가한다. 그림 5 에 이를 자세히 나타낸다.

<표 1> 2 호기 Vent 관 하부 주변 조사결과 [5]

Vent 관 번호	조사 일자	Sleeve	Sand Cushion Drain	Bellows Cover
1	2012. 12.11	0	0	0
2	2013. 3.6	0	0	0
3	3.5	⊗	⊗	0
4	3.5	⊗	⊗	0
5	3.13	⊗	⊗	0
6	3.13	⊗	⊗	0
7	3.14	0	0	0
8	3.15	0	0	0



(그림 4) 8 번 Vent 관의 Sleeve 부위 조사영상 [5]



(그림 5) Color 관측영상에서 Blue 성분 추출

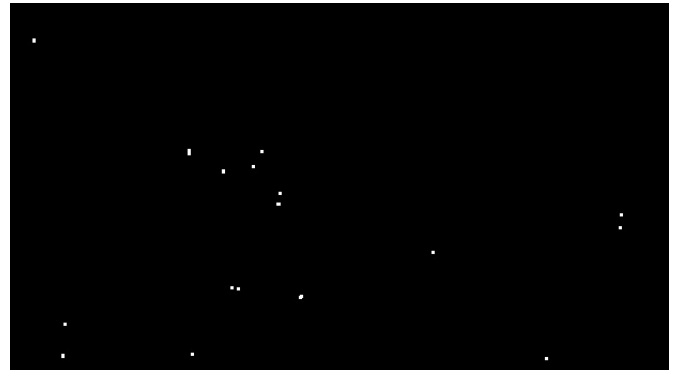
그림 4의 color 관측 영상을 RGB 성분으로 분리하고, blue 성분만 표시한 것을 그림 5에 나타낸다. 그림 4에 잘 보이지 않는 Speckle 성분이 그림 5의 blue 성분 추출영상에는 잘 보이고 있음을 알 수 있다. 방사능 물질은 핵분열 반응을 통해 감마선 에너지를 방출한다. 그 에너지 감마선에 피폭되면 전자회로는 백색잡음이 발생되며, 이들 백색잡음이 카메라 영상센서에는 Speckle로 나타난다. 방사능 물질의 핵분열 반응은 확률론적으로 random 하게 일어난다. 방사능 물질과의 거리가 같다면, 2차원 영상센서의 전체 화면에 나타나는 Speckle 발생 분포는 유사하지만, 프레임 단위로 관측할 경우 영상 센서의 동일 위치에 Speckle이 나타날 확률은 극히 낮다. 후쿠시마 사고 원자로의 노심 용융에 의해 대량 누출된 방사성 핵종 Cs-137의 반감기는 30년 이상이다. 이는 Cs-137 방사능 물질에서 핵분열 반응에 의해 방출되는 감마선 에너지가 2시간 (동경전력이 제공한 조사 동영상의 running time에 근거) 이내의 조사기간에는 변화가 없음을 의미한다. 즉, 관측 카메라의 단일 영상 프레임은 동일한 세기의 감마선 에너지에 의해 영향을 받는다고 할 수 있다. 따라서, 로봇 탑재 카메라가 정지된 정적인 환경에서 Vent 관을 조사할 경우, 간단한 차영상(background subtraction) 처리로 감마선 피폭에 의한 Speckle 분포를 추출할 수 있다. 식 (1)을 이용하여 구한 결과를 그림 6에 나타낸다. 그림 6은 2012년 12월 11일에 도시바 4족 보행로봇이 1번 Vent 관 조사를 위해 진입하는 장면이다. 그림 6에서 황색 원안에 고선량 감마선에 의한 Speckle이 포함되어 있다.



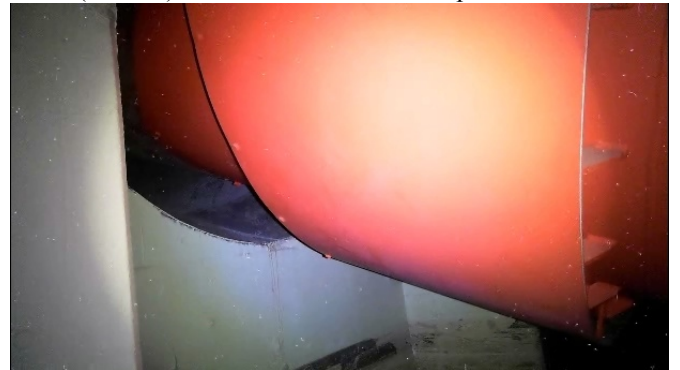
(그림 6) 1번 Vent 관 조사를 위해 진입하는 장면

$$I_n \text{ Speckle} = I_n - I_{n-1} \quad (1)$$

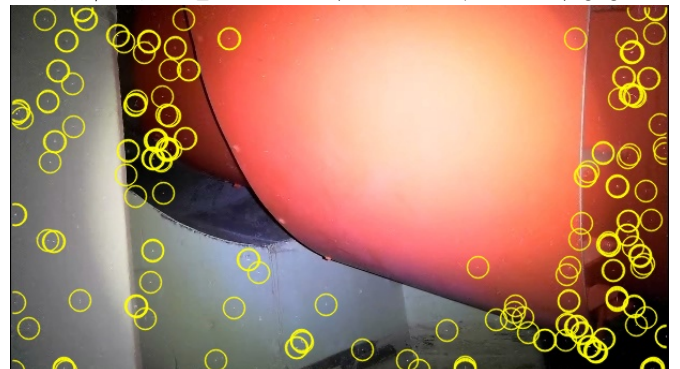
식 (1)에서 n 번째 이미지 프레임의 Speckle 분포는 현 (n 번째) 이미지 프레임에서 이전 (n-1 번째) 이미지 프레임을 감산하여 구한다. 그림 7은 그림 6의 영상에서 이전 영상을 감산하여 구한 Speckle 성분을 나타낸다. Speckle은 한 점(pixel)으로 나타나기 때문에 보다 잘 표현하기 위해서 speckle pixel 주변을 dilation 처리하였다. 그림 6, 7의 화면상부에 Speckle이 보이지 않는 것은 로봇에 탑재된 조명에 의해 구조물이 반사되어, Speckle이 백색 배경에 함몰되었기 때문이다. 일반적으로 Speckle은 화면에 고르게 분포되어 나타난다.



(그림 7) 차영상 처리에 의한 Speckle 추출



(그림 8) 1번 Vent 관의 Sleeve 주변 조사영상



(그림 9) 1번 Vent 관의 Sleeve 주변 Speckle 분포

그림 6과 그림 9를 비교하면 speckle 분포의 차이를 알 수 있다. 이는 Vent 관 Sleeve 주변의 감마선 선량율이 높음을 의미한다. 본 논문에서는 관측 화면에 나타나는 speckle 개수를 식 (2)로 구하여 각 Vent의 감마선 선량율을 세기를 정성적으로 추정하고자 하였다.

$$I_n \text{ Total Counts of Speckle} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m S_{ij} \quad (2)$$

$$S_{ij} = 1, \text{ if } G_{ij} > G_{\text{threshold}} \quad (3)$$

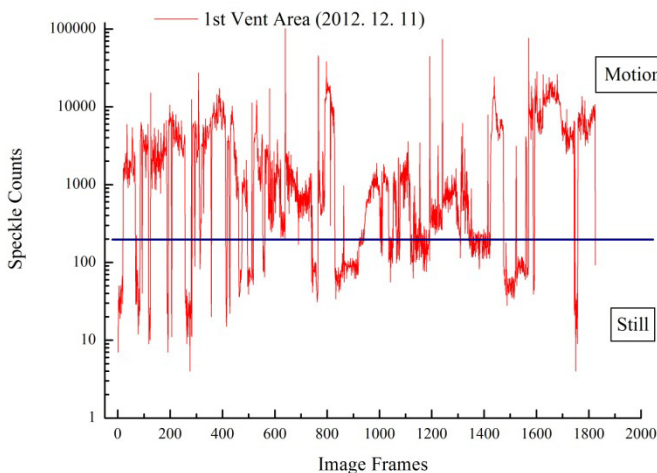
$$S_{ij} = 0, \text{ if } G_{ij} \leq G_{\text{threshold}} \quad (4)$$

식 (2) 에서 S_{ij} 는 관측영상의 (i, j) 위치에서의 Speckle 이다. 이는 식(3), (4)의 판별기준에 따라 (i, j) 위치에서의 gray level G_{ij} 값이 기준치(threshold) 보다 클 경우에 Speckle 로 카운트한다. 표 2 에는 ㈜ 동경전력이 공개한 2 호기 원자로 건물지하 8 개 S/C Vent 관 주변의 조사영상의 특성을 요약하였다.

<표 2> 2 호기 Vent 관 조사 동영상 요약

Vent 관 번호	조사 일자	Size (MB)	Frame Size (H×V)	Total Frames
1	2012. 12.11	39.8	616×344	1,825
2	2013. 3.6	16.3	608×340	4,153
3	3.5	14.7	616×344	619
4				
5	3.13	7.29	616×344	286
6				
7	3.14	11.4	616×344	397
8	3.15	5.31	616×344	219

표 2 에서 vent 관 3,4 번과 5,6 번은 그림 3 에 나타난 바와 같이 중간지점에서 카메라의 방향만을 바꾸어 관측하였기 때문에 각각 하나의 동영상으로 공개되었다. 그림 10 은 1 번 Vent 관 조사 동영상을 식(2)를 통하여 구한 Speckle 개수를 프레임 단위로 나타낸 것이다.



(그림 10) 1 번 Vent 관 조사 동영상의 Speckle 분포

그림 10 에서 X 축은 동영상을 단일 프레임으로 분해한 프레임 번호를 나타내고, Y 축은 식(1), (2)를 이용하여 구한 Speckle 개수를 나타낸다. 그림에서 Peak 성분은 로봇 탑재 카메라의 움직임이 급격하거나, 조명의 급격한 변화에 따른 현상을 나타낸다. 기준선 이하의 speckle 개수는 로봇 탑재카메라가 정지한 상

태에서 Vent 관 주변을 관측한 것이다. 본 논문에서는 기준선 이하의 영상에 대해서 Speckle 분포를 계산하였다. 그 결과를 표 3 에 나타낸다.

<표 3> 2 호기 Vent 관의 Speckle 분포 (평균)

Vent 관 번호	Total Frames	Speckle Frames (기준선 이하)	Total Speckles	Average Speckles
1	1,825	488	41,228	84.45
2	4,153	3,689	28,872	7.83
3	619	134	8,656	64.60
4				
5	286	154	12,512	81.25
6				
7	397	71	10,900	153.52
8	219	12	2,116	176.33

표 3 의 결과로부터 8 번 vent 관 주변이 감마선 선량율이 가장 높음을 알 수 있다. 단, 관측영상에서 조명에 의해 Speckle 성분이 함몰되는 영역은 동일하다는 것 과 감마선 누적피폭선량에 의한 카메라 전자회로의 영향은 미미하다는 가정을 전제로 한다.

3. 결론

본 논문에서는 일본의 ㈜ 동경전력이 공개한 후쿠시마 제 1 원자력발전소 2 호기 원자로건물 지하의 S/C 와 PCV 를 연결하는 8 개 Vent 관 주변 조사 영상들을 분석하였다. 영상에는 고선량 감마선에 의한 Speckle 들이 관측되었다. 일반적으로 감마선 세기가 강할수록 카메라 관측 영상에 나타나는 Speckle 들의 개수는 증가한다. 본 논문에서는 고선량 감마선에 의한 Speckle 특성을 분석하여 S/C 와 PCV 를 연결하는 8 개 Vent 관중 방사능 오염물질이 많은 곳을 특정하였다. ㈜ 동경전력이 공개한 동영상 (digest) 요약본을 모두 분석한 결과 8 번 Vent 주변의 감마선 선량율이 가장 높았다.

참고문헌

- [1] (주) 동경전력, “福島第一原子力発電所向けの4足歩行ロボットの開発について”, http://www.toshiba.co.jp/about/press/2012_11/
- [2] (주) 동경전력, “2号機ベント管下部周辺調査の実施について”, 발표자료, 2012. 12
 <http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/>
- [3] (株)東京電力, “2号機ベント管下部周辺調査の途中経過及び今後の予定について”, 2012. 12.25
- [4] (株)東京電力, “遠隔タスクフォース4足歩行ロボット技術WGでの検討状況について”, 2013. 1.31
- [5] (株)東京電力, “福島第一原子力発電所2号機ベント管下部周辺調査結果について”, 2013.3.15