

# 움직임 정보를 이용한 로봇의 신뢰성 평가

조재완, 서용철, 정경민  
한국원자력연구원 원자력융합기술개발부  
e-mail:jwcho@kaeri.re.kr

## A Reliability Evaluation of the Robot using an Motion Feature

Jai-Wan Cho, Yong-Chil Seo, Kyung-Min Jeong  
Division of Nuclear Convergence, Korea Atomic Energy Research Institute

### 요 약

본 논문에서는 로봇의 움직임 특성을 추출하여 로봇 시스템의 신뢰성을 평가하는 방법을 제안한다. 원자력 발전소 증기 발생기 전열관의 비파괴 검사에 사용되는 ECT 검사용 Probe 가이드 로봇 (이하 증기발생기 로봇으로 기술)을 대상으로 하였다. 증기발생기 로봇의 동작 상태를 감시하기 위해 관측 카메라가 설치된다. 증기발생기 수실은 로봇 설치 및 해체를 위한 원형의 출입구 (Man Way)를 제외하고는 밀폐된 공간이다. 증기 발생기 전열관의 비파괴 검사 중에는 로봇과 로봇의 동작을 감시하는 관측 카메라만 설치된다. 관측 카메라가 고정되어 있다면, 배경의 변화를 야기하는 외란은 없다고 가정할 수 있다. 시간적으로 이웃하는 2 개의 관측 영상을 미분 (차 영상) 처리하면, 로봇 시스템의 이동 성분만 추출된다. 이러한 이동성분의 크기를 계산하여 로봇의 전체 행정거리 (ECT Probe를 검사위치에 안내하기 위해 로봇 기구부가 움직이는 범위)에 대해 영상 프레임 단위로 전개하면 특징의 고유 궤적이 나타난다. 이러한 고유 궤적과 다른 패턴을 보이는 로봇의 움직임 궤적은 예러로 간주한다. Burn-in 시험 (원자력 발전소 현장에 투입하기 전에 실험실에서 현장 적용의 타당성을 검증하기 위해 수행하는 시험) 중에 있는 증기발생기 로봇에 대해 본 논문에서 제안한 방법으로 신뢰성 평가를 수행하였으며, 그 결과 및 문제점 등에 대해 기술한다.

### 1. 서론

원자로 고온 냉각재 (1차 냉각재, 방사능 핵종을 포함)는 원자로-Hot Leg (고온 배관)-증기발생기-Cold Leg (저온 배관)-원자로의 순환과정을 거친다. 고온 냉각재가 증기발생기 전열관 내부를 통과할 때에 열 전도에 의해 증기발생기 전열관 외부에 있는 2차 냉각재 (순수, 방사능 오염물질이 없음)를 데워서 증기를 발생시킨다. 증기의 힘으로 터빈을 돌려 전기를 생성한다. 고온 냉각재 (방사능 핵종이 포함된 냉각수)와 2차 냉각재 (순수)는 증기발생기 전열관에 의해 물리적으로 격리되어 있다. 증기발생기 전열관의 결함 (crack 및 응력부식균열)으로 인해 1차 냉각재가 누설되면 1차 냉각재에 포함된 방사능 물질이 2차 냉각재 (순수)를 오염시키며, 오염된 2차 냉각수는 발전소 외부로 유출될 위험이 크다. 이를 방지하기 위해 원자력발전소 정기점검기간에 증기발생기 전열관에 대한 비파괴 (ECT, UT 및 VT) 검사를 수행하여 증기발생기 전열관의 건전성 (균열, 마모, 감육 등의 이상 유무)을 평가한다. 증기발생기 전열관을 지지하는 증기발생기 수실은 1차 냉각재의 유동 경로이다. 정상 가동 중에는 반감기가 짧은 방사능 핵종들이 포함된 고온 냉각수가 흐르므로 방사화된다. 따라서, 증기발생기 수실에서 수행되는 전열관에 대한 비파괴 검사는 로봇에 의해 수행된다. 원자력 작업종사자의 방사능 피폭관리는 ALARA (as low as reasonably available) 및 ALARP (as low as reasonably practical) 원칙이 적용되므로 증기 발생기 수실에서 이루어지는 전열관 들의 비파괴 검사도 가능한 한 사람의 개입이 적어야 한다. 따라서, 로봇의 설치 및 해

체가 가능한 한 단시간에 수행되어야 하며, 전열관의 비파괴 검사 중 로봇의 기능 장애에 의해 작업원이 증기발생기 수실에 들어가서 로봇의 장애 복구 등의 작업으로인해 방사선에 피폭되는 일은 발생되지 않아야 한다. 그러므로 증기발생기 전열관 비파괴 검사에 사용되는 로봇 시스템은 고도의 신뢰성이 요구된다.

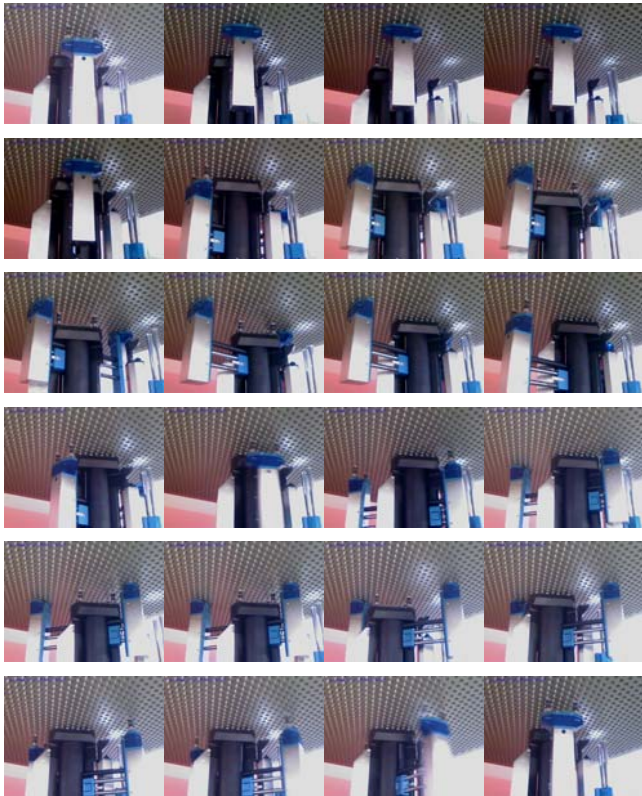
### 2. Burn-In 시험

원자력발전소에 설치되는 주요 계통, 구조물 및 기기 (SSC, systems, structures, and components) 는 발전소 현장에 설치되기 전에 공장 또는 시험시설에서 Burn-in 시험을 통해 신뢰성을 검증한다. 그림 1에 Mock-up에 설치된 증기발생기 로봇을 보이고 있다 [1].



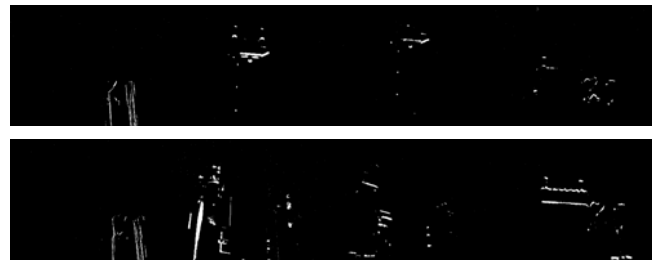
(그림 1) Mock-up에 설치된 증기발생기 로봇

그림 1의 상부는 전열관들을 지지하는 증기발생기 수실의 상부를 모사한 것이다. 1/2" 직경의 전열관들이 60° 각도로 1" 간격으로 13,000여개가 규칙적으로 배열되어 있다. 증기발생기 로봇은 전열관의 4개 홈(hole)에 finger를 삽입하여 로봇 몸체를 지지하고, 비파괴 검사용 ECT Probe를 Guide (그림 1의 오른쪽)를 통해 인근의 전열관 내부에 삽입(push/pull 동작) 하여 검사를 수행한다. 해당 전열관 검사가 종료되면 4개 홈에 삽입된 finger의 lock/unlock을 통해 로봇 몸체가 이동하여 다른 위치의 전열관을 검사한다. 따라서, 증기발생기 로봇은 이동, 정지(몸체 finger cam lock/양팔 finger cam unlock 또는 반대), 검사(ECT Probe push/pull), 이동, 정지(몸체 finger cam unlock/양팔 finger cam lock 또는 반대), 검사의 반복 시퀀스를 통해 13,000여개의 전열관들을 전수 검사한다. 그림 2는 Burn-in 시험을 위해 ECT probe 검사를 모사한 증기발생기 로봇의 한 주기 시험 loop의 동작들을 나타낸 것이다.



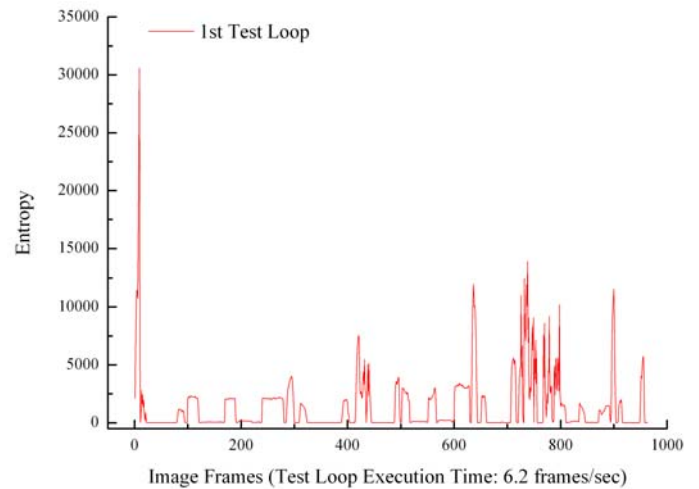
(그림 2) ECT Probe Guide를 위한 증기발생기 로봇의 움직임 (한 주기의 시험 loop) 관측 영상

그림 2는 증기 발생기 로봇에 대한 Burn-in 시험을 위해 그림 2에 나타난 로봇의 움직임 영상들에서, 주변 조명의 외란 (clutter) 이 없다고 가정하면, 시간적으로 이웃하는 2 영상들을 감산 (subtraction) 처리하면 로봇의 움직임 성분만이 표현된다. 이를 그림 3에 나타낸다. 이동 성분의 전체 크기(entropy)를 계산하여 한 주기 시험 loop 기간의 영상 프레임으로 전개하면 로봇의 이동궤적을 알 수 있다. 움직임이 클 경우에는 entropy가 크게 나타나고, 움직임이 없거나 작을 경우에는 적은 값으로 표현된다.



(그림 3) 증기발생기 로봇의 움직임 성분 추출

그림 3은 그림 2의 상부 8개 영상의 motion 성분을 추출한 것을 나타낸다. 그림 4는 그림 2에 나타난 한 주기 시험 loop에서 추출된 이동 성분을 영상프레임으로 전개한 궤적을 나타낸다. 그림 4에서 X축은 한 주기 시험 loop의 소요시간을 나타내고, Y축은 증기발생기 로봇의 이동 성분의 크기(entropy)를 나타낸 것이다. 크기는 이웃하는 2 영상의 미분 영상 (2차원)에서 밝은 성분을 모두 합한 값을 나타낸다. 본 논문에서는 신뢰성을 평가하기 위하여 Test Loop들의 운동성분 궤적의 유사성을 비교하였다. 이를 위한 척도로 이웃하는 2 궤적의 상관계수를 계산하였다. 2 궤적의 상관계수를 구하기 위해 궤적 (주기)의 시작점은 그림 4에 나타난 바와 같이 Entropy가 가장 큰 값으로 하였다. 그림 4에서 Entropy가 가장 큰 값은 증기발생기 로봇의 움직임이 가장 큰 회전 운동을 의미한다.



(그림 4) 증기발생기 로봇의 이동 궤적

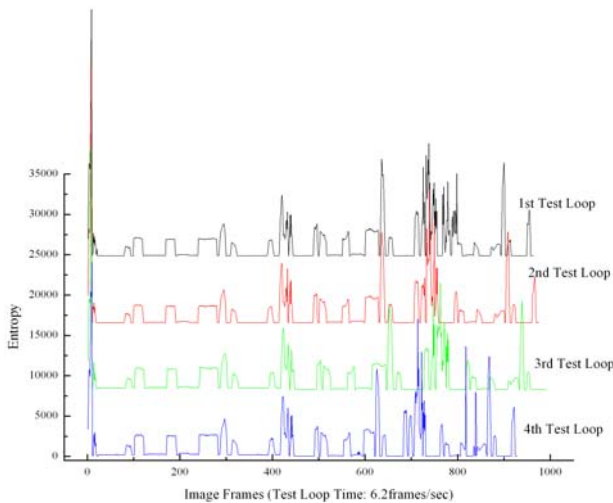
### 3. 실험 및 결과

실험은 그림 2에 나타난 증기발생기 수실 Mockup에 로봇을 설치한 후 약 1 시간 동안 수행되었으며, Test Loop는 23회 반복되었다. 표 1에 이를 요약하였다. 표 1에 나타난 바와 같이 관측 카메라로 측정(획득)한 영상 프레임들의 개수는 Test Loop에 따라 편차가 발생하였다. 이는 로봇제어 명령어가 전송 도중에 missing 되었거나 또는 관측 카메라의 영상 획득이 missing 될 경우를 고려하여야 한다. 그림 5에는 1~4 회의 Test Loop 수행시의 증기발생기 로봇의 움직임 궤적을 나타낸다.

<표 1> 증기발생기 로봇의 운동궤적 측정요약

Test Loop	수행시간 (frames)	상관 계수	Test Loop	수행시간 (frames)	상관 계수
1	963		13	974	0.59
2	975	0.75	14	975	0.76
3	1,009	0.48	15	975	0.95
4	929	0.43	16	975	0.98
5	939	0.34	17	981	0.54
6	978	0.24	18	964	0.54
7	970	0.55	19	964	0.92
8	981	0.53	20	947	0.57
9	969	0.73	21	964	0.52
10	977	0.72	22	967	0.72
11	975	0.76	23	974	0.62
12	980	0.62	Avg.	969.78	0.63

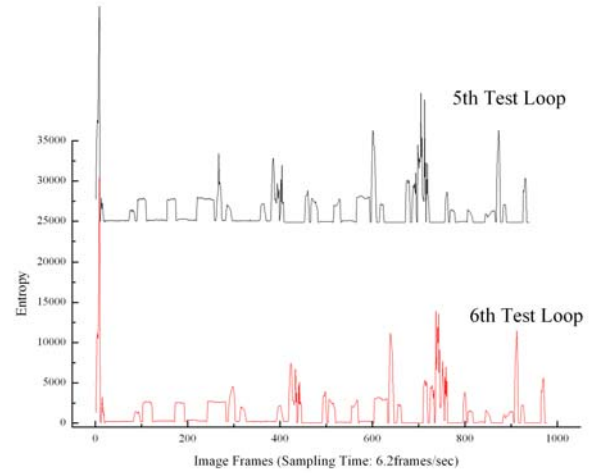
Frame Rates : About 6.2 frames/sec



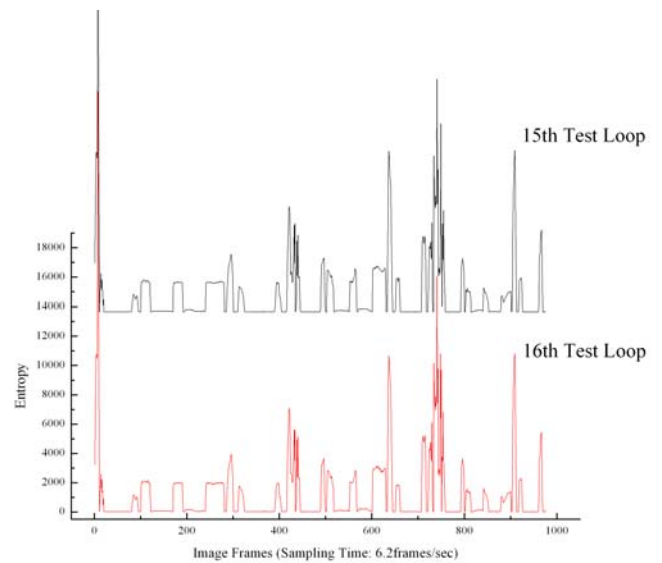
(그림 5) 증기발생기 로봇의 움직임 궤적

표 1에 나타난 상관계수는 이웃하는 2 개의 궤적 (예를 들면, 1st 궤적과 2nd 궤적, 2nd~3rd 궤적, n-1 th ~ n th 궤적) 간의 상관계수를 계산한 값이다. 표 1과 그림 5에 나타난 바와 같이 동일한 Test Loop를 수행하였음에도 불구하고, 관측카메라가 측정한 Test Loop 수행시간 (영상 프레임개수로 표시)은 차이가 있음을 나타낸다. 특히, 3rd Test Loop의 수행시간은 1,009 frames 인데 비해 4th Test Loop 수행시간은 929 frames 으로 약 13초 정도의 시간차이가 발생한다. 3rd Test Loop 수행시에는 증기 발생기 로봇이 천천히 움직였고, 4th Test Loop 수행시에는 보다 고속으로 움직였음을 의미한다. 증기발생기 검사 측면에서 보면, 시간차이는 존재하지만 원하는 위치로 이동하였으므로 에러(error)로 간주되지는 않는다. 그림 6은 23번의 Test Loop 시험 중 상관계수가 가장 낮은 5, 6번째의 Test Loop 수행시의 증기발생기 로봇의 운동궤적을 나타낸다. 그림 7은 상관계수가 가장 높은 15, 16번째 Test Loop 수행시의 증기발생기 움직임 궤적을 나타낸다. 그림 6, 7에서 증기발생기 로봇의 이동 궤적의 패턴은 상

관 계수 (correlation coefficient) 에 관계없이 유사하다. 그림 6과 같이 상관계수가 낮은 경우에는 5 번째 Test Loop 에 비해 6번째 Test Loop 는 조금씩 지연되어 수행되고 있음을 나타내고, 그림 7에 나타난 상관계수가 가장 높은 15, 16번째의 Test Loop 는 시간 (X) 축에서 거의 동일한 주기로 패턴이 반복되고 있음을 나타낸다. 이는 증기발생기 로봇의 신뢰성 평가적으로도 상관계수를 이용할 경우 운동궤적의 기준점(시작점)을 선정하는 것과, 에러와 정상 동작사이를 명확히 구분 (상관계수의 크기로 표현) 하기 위한 운동궤적의 패턴도 중요한 요소이다.



(그림 6) 증기발생기 로봇 궤적의 상관계수 (0.24)

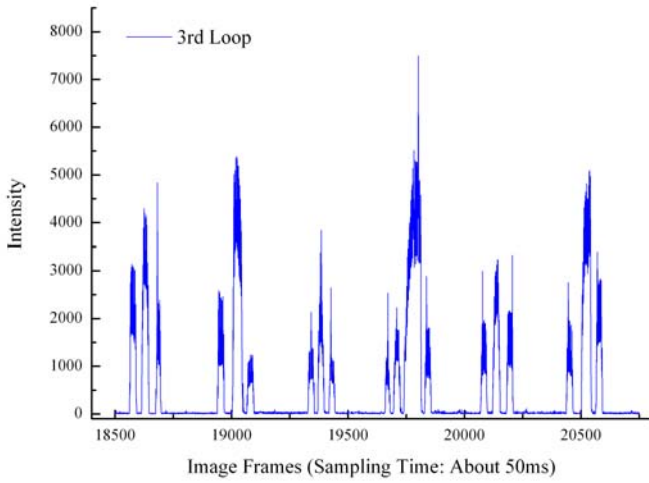


(그림 7) 증기발생기 로봇 궤적의 상관계수 (0.98)

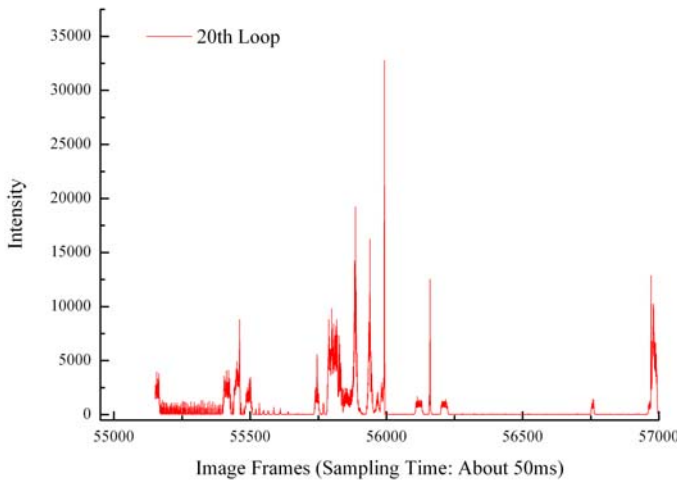
그림 8, 9는 동일한 로봇을 증기발생기 Mock-Up 에 설치하지 않고, Table 위에 두고 Dummy 상태에서 Test Loop를 수행하였으며, 로봇의 상부 (그림 1 ~ 7 은 하부에서 관측)에서 관측한 이동 궤적을 나타낸다. 그림 8은 정상 동작상태의 이동 궤적이고, 그림 9는 fail (고장)이 발생하였을 경우의 증기발생기 로봇의 움직임 궤적을 나타낸다. 그림 8과 9에 나타난 정상 동작과 고장 발생궤적사이의



상관계수는 0.09 이었다. 표 2에 Dummy 상태에서의 Test Loop 시험 결과를 나타낸다.



(그림 8) 증기발생기 로봇의 움직임 궤적 (정상동작)



(그림 9) 증기발생기 로봇의 움직임 궤적 (fail)

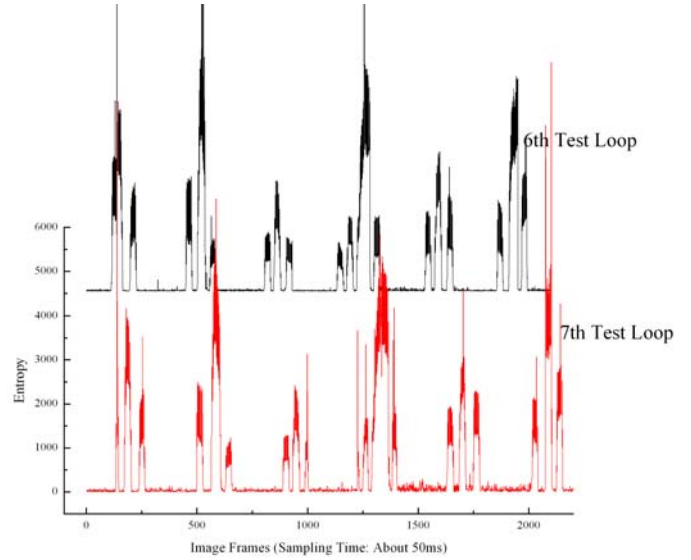
<표 2> 직선/회전 운동 중인 증기발생기 로봇의 운동궤적

Loop	수행시간 (frames)	상관 계수	Loop	수행시간 (frames)	상관 계수
1	-		11	2,112	0.42
2	2,005		12	2,017	0.32
3	2,090	0.26	13	2,019	0.70
4	1,983	-0.09	14	2,004	0.45
5	2,014	0.09	15	1,975	0.03
6	1,940	0.25	16	1,965	0.26
7	2,082	-0.01	17	1,969	0.47
8	1,955	0.06	18	-	
9	2,027	0.08	19	1,957	0.11 <sup>*1)</sup>
10	2,012	0.27	20	fail	-0.02 <sup>*2)</sup>

- : background clutter 로 인해 정확한 계산 불가  
 \*1) : 17th, 19th Test Loop 사이의 상관계수  
 \*2) : 16th, fail Test Loop 사이의 상관계수

표 2에서 상관계수가 가장 낮은 궤적은 6 ~ 7th Test Loop 수행시의 궤적이다. 그러나 육안으로 확인할 경우에는 그림 10에 나타낸 바와 같이 약간의 시간지연을 제외

하고는 정상적인 동작을 나타낸다.



따라서, 증기발생기 로봇에 대한 신뢰성 평가척도로 상관 계수를 고려할 경우, 정상/이상/고장 등의 구분이 용이한 로봇의 운동궤적과, 기준점 (시작점)에 대한 정교한 알고리즘이 요구된다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 로봇의 움직임 특성을 추출하여 로봇 시스템의 신뢰성을 평가하는 방법을 제안하였다. 시간적으로 이웃하는 2 개의 관측 영상을 미분 (차 영상) 처리하면, 로봇 시스템의 이동 성분만 추출된다. 이러한 이동성분의 크기를 계산하여 로봇의 전체 행정거리 (ECT Probe를 검사위치에 안내하기 위해 로봇 기구부가 움직이는 범위)에 대해 영상 프레임 단위로 전개하면 특정의 고유 궤적이 나타난다. 이러한 고유 궤적과 다른 패턴을 보이는 로봇의 움직임 궤적은 예러로 간주한다. 로봇의 동작 특성 평가에서는 명령어를 보내고, 명령어 수행의 결과로 Encoder 또는 Resolver (센서) 값의 return 값으로 동작유무를 확인한다. 본 논문에서 제안한 방법으로 증기발생기 로봇의 동작 특성을 평가한 결과 동일한 Test Loop 의 반복수행에 대해서, 수행되는 시간을 영상프레임단위로 계측하였을 경우 크기는 10 초 이상의 차이가 발생하였다. 이는 센서 (Encoder 또는 Resolver) 값과 로봇의 실제 동작이 일치하지 않을 수도 있음을 의미한다. 따라서, 관측카메라를 이용하여 로봇의 실제 동작을 독립적으로 육안 확인할 수 있기 때문에, 본 논문에서 제안한 신뢰성 평가방법도 유용하다고 생각된다. 다만, 고장/정상/이상 상태를 판단하기 위한 척도로 상관계수를 사용할 경우, 정상/이상/고장 등의 구분이 용이한 로봇의 운동궤적 생성과, 기준점 (시작점)의 결정이 중요함을 알 수 있었다.

#### 참고문헌

[1] 정경민, “증기발생기 전열관 검사 및 Plugging 용 경량 로봇”, 한국원자력연구원 내부 보고서