

적외선열화상에 의한 발전용 밸브 누설평가 연구

A Study on the Leakage Evaluation for Power Plant Valve Using Infrared Thermography Method

이상국

Sang-Guk Lee

초 록 발전용 밸브 내부의 누설은 냉각 기능 상실 및 방사선물질 방출 등 안전계통의 성능 저하와 많은 에너지 손실 등 발전소 운전에 막대한 손상 및 사고를 초래하게 된다. 본 논문은 신뢰성 높은 진단 방법 개발을 위하여 국내 원자력발전소 2차계통의 누설 발생 또는 내부 부품의 손상이 발생할 수 있는 밸브를 대상으로 현장시험 및 모의누설시험시의 적외선열화상 측정 실험을 수행함으로써 단일계측방식의 불확실성을 제거하고 향후 누설진단에 대한 확대 적용을 도모하고자 하였다. 발전소 현장시험 및 밸브 모의누설시험시의 밸브 누설 상태에 따른 적외선열화상 이미지 측정 실험을 통하여, 적외선열화상 측정 방법은 밸브 누설 상태의 과정을 신속하고 정밀하게 측정 가능하며 향후 많은 종류의 밸브 누설진단에 활용함으로써 누설에 따른 막대한 에너지 손실 및 사고 예방의 유용한 기법으로 확대 적용이 가능할 것으로 생각된다.

주요용어: 발전용 밸브, 누설평가, 적외선열화상, 터빈 배수밸브, 주증기 응축수 밸브, 밸브 모의누설시험

Abstract This study was conducted to estimate the feasibility using thermal image measurement that is applicable to internal leak diagnosis for the power plant valve. Abnormal heating of valve surface associated with high temperature steam flow toward valve outlet side in the condition of low temperature is a primary indicator of leakage problems in high temperature and pressure valves. Thermal imaging enables to see the invisible thermal radiation that may portend impending damage before their condition becomes critical. When steam flow in valve outlet side in the condition of low temperature is converted into heat transmitted through the valve body due to the internal leakage in valve. The existence of abnormally increasable leakage rate in the valve will result in abnormally high levels of heat to be generated that can be quickly identified with a thermal image avoiding energy loss or damage of valve component. From the experimental results, it was suggested that the thermal image measurement could be an effective way to precisely diagnose and evaluate internal leak situation of valve.

Keywords: Power Plant Valve, Leak Evaluation, Thermal Image, Turbine Condensing Water Exhausting Valve, Main Steam Condensing Water Valve

1. 서 론

발전용 밸브 내부에서 발생하는 유체누설은 발전소 효율 저하로 인한 출력 손실을 발생시켜 막대한 경제적 손실을 일으킬 뿐만 아니라 캐비테이션

(cavitation), 플래싱(flushing), 침식(erosion) 등에 의해 밸브 및 트랩의 핵심 부품이 쉽게 손상되어 기기 성능 저하를 초래하게 되므로 이를 조기에 탐지하고 평가함으로써 밸브의 상태 정보 제공으로 누설을 최소화하거나 예방하는 기술의 개발이 요구

된다[1-3]. 현재까지 밸브내부누설 진단기법으로는 온도차, 음향, 초음파 유량측정기 등에 의한 탐지기법이 있으나, 이들 단일계측방식에 의한 누설평가 방법은 각각의 장단점을 가지고 있어 보다 정확하고 신뢰도 높은 탐지와 기법간 상호보완적인 결과 도출을 위해서는 새로운 기법의 개발과 함께 다중계측방법의 적용이 필요한 실정이다[1,5]. 기존 진단기법과 달리, 적외선열화상(infrared thermography)기법은 물체의 표면에 나타나는 열을 눈으로 볼 수 있도록 하는 방법으로 진단 결과가 신속하고 빠른 결과와 함께 바로 눈으로 실제로 볼 수 있는 특징을 가지고 있다. 따라서 밸브내부누설에 의해 발생하는 밸브외부표면에 발생하는 적외선을 이용할 수 있으므로 적외선열화상 카메라가 설비진단기로서 가장 유행하는 도구로 활용되고 있다[4].

본 논문은 밸브내부누설 진단방법중의 신뢰성 높은 진단방법 개발을 위하여 국내 원자력발전소 2차계통의 누설발생 또는 내부부품의 손상이 발생할 수 있는 밸브를 대상으로 현장시험 및 모의누설시험을 통해 적외선열화상 이미지 기법을 이용한 실험을 수행함으로써 단일계측방식의 불확실성을 제거하고 향후 누설진단에 대한 확대 적용을 도모하고자 수행한 연구결과를 소개하고자 한다.

2. 실험방법 및 고찰

2.1. 실험방법

2.1.1. 시험밸브

본 연구의 대상 밸브는 현장측정용으로 현재 국내 원자력발전소 2차계통에서 사용중인 고압 터빈 배수 및 배기계통 밸브(turbine condensing water exhausting valve)와 모의실험용으로는 주증기 응축수 밸브(main steam condensing water valve)이며 각 밸브에 대한 사양을 Table 1과 Table 2에 각각 나타내었다. 현장 측정 밸브는 터빈에 순환된 후 고온 응축수를 배기 및 배수 조절을 목적으로 터빈 내부 압력을 조절하는 56~85 bar의 압력으로 구동되는 공기구동밸브(air operated valve)이다.

또한 모의실험용 밸브는 증기계통의 응축수 배수 조절을 목적으로 고온/고차압(250 ℃, 차압 20 bar) 조건에서 이용되는 중요한 밸브로 한번 누설 또는

Table 1 Specifications of turbine condensing water exhausting valve

	Turbine condensing water exhausting valve
System	AC (main steam)
Vale size	50.8 mm
Valve type	Globe
Valve name	AC-HV-014, 015A, 016
Seat size	48 mm
Fluids	Condensed water

Table 2 Specifications and type of main steam condensing water valve

	Main steam dump valve
System	AC (main steam)
Vale size	50.8 mm
Valve type	Globe
Material	WCB 1500
Seat size	48 mm
Fluids	Condensed water

고장이 발생되면 내장품의 손상이 지속적으로 확대되며 성능이 저하되고 출력손실을 야기시키게 된다. 또한 정상운전중의 내부누설이 발생하면 후단 배관이 길어서 응축, 기화의 반복과정에 따른 수격작용으로 인한 계통기기의 손상을 초래한다. 간헐적으로 작동되어 전후단 온도감지 등의 방법으로는 초기누설을 판단하기 어렵고 수격작용 발생 및 소음 등으로 누설을 확인하고 있으나 정량적인 누설량 추정이 필요하다. 적은 유체누설량으로는 초기 누설을 감지하기 어렵고 전후단 온도차 및 음향방법으로 누설을 점검하고 있으나 정량적인 방법으로 누설량을 추정하기 어려운 실정이다.

2.1.2. 실험장치 및 방법

현장 측정을 위한 대상 밸브인 AC-HV-014, AC-HV-015A 및 AC-HV-016은 국내 원자력발전소 터빈 건물 115 ft에 위치한 밸브로 구동기는 피셔(Fisher)로 부속기기는 리미트 스위치(limit switch) 2개 솔레노이드(solenoid) 밸브가 1개 부착되어 있는 밸브로 현장에서 적외선열화상 측정을 수행하였다. Fig. 1은 발전소 현장 측정을 위한 대상 밸브의

대표적인 형상을 나타낸다. 모의누설은 Fig. 2의 고온 고압 유체누설시험설비를 이용하였으며 최대 약 110 bar 및 300 ℃까지 시험이 가능하도록 설계되어 있다.

동 시험설비는 원자력발전소 고온-고차압 계통의 밸브 및 트랩에 대한 현장 누설밸브에 설치된 시험편을 이용하거나 실물시료를 제작하여 원자력발전소 현장조건과 동일한 온도/압력조건을 모사할 수 있도록 되어 있으며 ASME Boiler & Pressure Vessel Code VIII Division 2, ANSI B16.5, ASME Section IX 를 적용하여 실증시험설비는 크게 고온-고차압의 물 또는 증기를 생산하고 저장하는 계통, 시험변수를 측정하는 계측 및 측정계통으로 분류되어 있다. 모의실험밸브는 발전소 현장에서 입수한 손상시험편의 손실량을 산정하는 것이 가장 선행적으로 고려되어야 할 사항이므로 밸브 트림(trim)부의 손상된 플러그(plug)의 손상을 측정이 불가능한

부분을 3차원 스캔(3D scanning) 방법으로 데이터를 취득(손상률)하여 손상률에 따른 누설 특성을 고려하여 실험을 수행하였다.

고온 고압에서 손상된 밸브 시료는 육안으로는 구별 가능하나 손상된 부분의 상세 치수 및 손상을 측정하기 위하여 Fig. 3과 같이 3차원 스캔 시스템을 활용하여 측정데이터를 3차원 카드 소프트웨어(3D cad software)에서 상세 치수 및 손상을 등 손상시료의 데이터를 확보 할 수 있었다. 밸브 트림(trim)부의 손상된 플러그(plug)의 손상을 측정하여 아래의 방법으로 미세개도율(1~5%)을 누설 조건으로 설정하였다.

밸브 트림(trim)부의 손상된 플러그(plug)의 손상이 발생하여 누설이 발생하는 경우를 모의하여 누설량은 누설 형상과 밸브 출입구의 차압에 의해 변화하며 압력에 따라 비례하므로 밸브 입구 압력을 변화시켜 누설량을 조절하였으며, 밸브 입구의 압력은 20 bar로 하여 Fig. 4에서 나타난 플러그 개방부분(opening area)의 면적을 변화시켜 개도율을 1~5%의 범위로 변화시켰다.

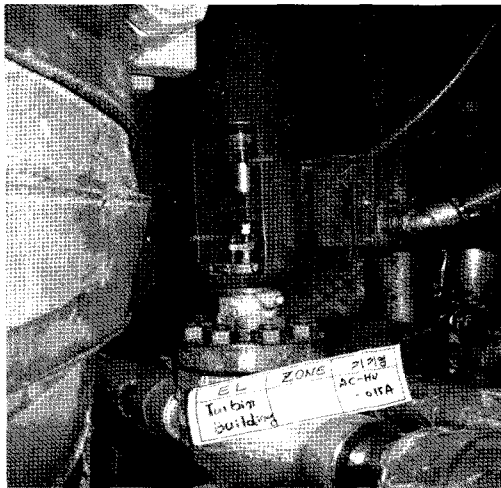


Fig. 1 Actual AC system valve of power plant valve

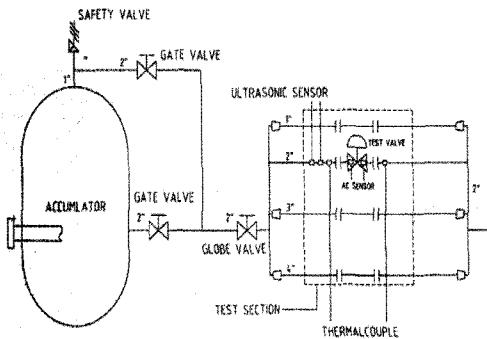


Fig. 2 High temperature-pressure leak test loop

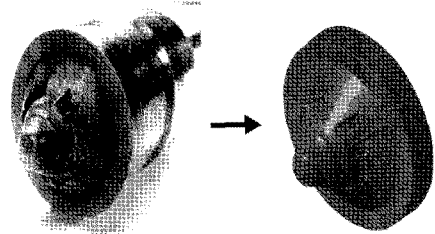


Fig. 3 Actual AC system valve of power plant valve

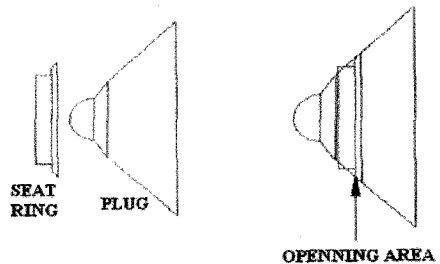
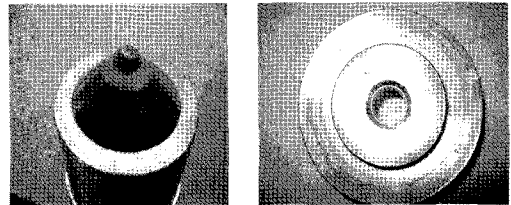


Fig. 4 Valve seat ring and plug, and leak method

적외선열화상 이미지 기법을 적용하기 위해서 사전에 복잡한 절차를 거쳐야 하는 번거로움이 수반된다. 또한 밸브 바디의 재질에 따른 방사율이 다르므로 사전에 주위 온도 및 반사보정용 테이프를 부착하여 보정을 해야만 한다. 본 연구에서 사용된 적외선열화상 카메라는 NEC사의 TH 9100 PRO를 이용하였다. 적외선열화상 카메라의 주요 기능은 Table 3과 같다.

Table 3 Specifications of thermal image camera

		TH9100PRO
Measuring range	Range 1	-40 to 120 °C
	Range 2	0 to 500 °C
	Range 3	200 to 2000 °C
Resolution	Range 1	0.08 °C, 0.03 °C
Accuracy	± 2 °C or ± 2% of reading whichever greater	
Pixels	0.41 Mega	
Effective image	752 (H) x 480 (V) Pixels	
Field of view	30.1° (H) x 22.7° (V)	
Sensitivity	1 Lux	
Focusing distance	30 cm to infinity	
Auto exposure	Provided	
Video signal	NTSC/PAL	

2.2. 실험결과 및 고찰

2.2.1. 현장측정 결과 분석 및 고찰

Fig. 5는 발전소 현장의 터빈 배수 및 배기밸브인 AC-HV-016의 적외선열화상을 측정된 결과로써 밸브 하부 방향에서 측정하였으며 밸브 하부 몸체

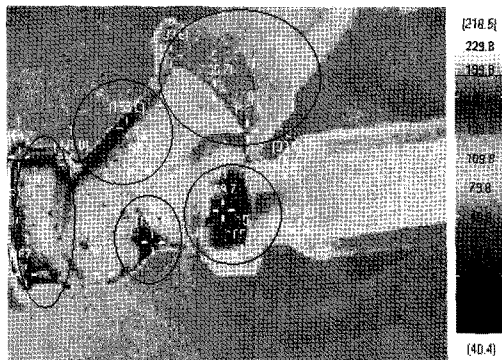


Fig. 5 Result of thermal image measurement for AC-HV-016 valve

까지 측정거리는 404 mm이었다. 적외선열화상에서 알 수 있듯이 밸브가 열려져 있으며 고온 유체의 누설 또는 이동을 확인할 수 있다. 현재 밸브와 배관의 전체를 통하여 열의 분포가 일정하지는 않지만 오른쪽보다는 왼쪽에서 열의 분포(원호로 표시한 부분)가 상당히 많이 이루어져 있음을 확인할 수 있다. 이러한 결과로부터 AC-HV-016 밸브 내부의 누설유체 방향 및 온도 분포의 평가가 가능함을 알 수 있다. Fig. 6은 발전소 현장의 터빈 배수 및 배기밸브인 AC-HV-015A의 적외선열화상을 측정된 결과로써 밸브 하부 방향에서 측정하였으며 밸브 하부 몸체까지 측정거리는 406 mm이었다. 진단 결과 밸브의 온도차를 명확하게 구분할 수 있으므로 밸브의 누설현상이 없음을 확인할 수 있다. 즉 위쪽과 왼쪽의 원호로 표시한 부분은 유체입구에 해당되며 고온 유체로 인한 열분포가 나타나지만, 오른쪽은 유체누설로 인한 열분포가 없는 것으로부터 누설현상이 없음을 알 수 있다.

Fig. 7은 발전소 현장의 터빈 배수 및 배기밸브인 AC-HV-014의 적외선열화상을 측정된 결과로



Fig. 6 Result of thermal image measurement for AC-HV-015A valve

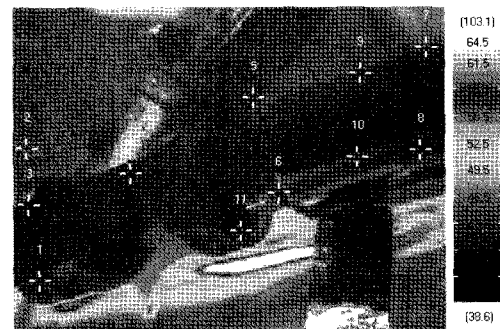


Fig. 7 Result of thermal image measurement for AC-HV-014 valve

써, 밸브 하부 방향에서 측정하였으며 밸브 하부 몸체까지 측정거리는 386 mm이었다. 적외선열화상에서 알 수 있듯이 진단결과 AC-HV-014는 현재 닫혀있는 밸브로 현재 누설이 발생하지 않고 있다는 것을 보여준다. 온도가 감지되는 부분은 열의 전도와 복사로 인하여 다른 밸브와 주위 온도가 측정됐음을 확인할 수 있다. 하지만 본 밸브는 적외선열화상을 측정하기 전에 음향측정에서 뚜렷한 누설현상을 보였는데, 이는 AC-HV-014 대상기는 오리피스에 있는 기기로 오리피스로 유체흐름이 있을 때 음향측정을 수행함으로써 누설 현상을 나타내었기 때문이다. 이러한 누설발생을 나타내는 음향발생 이유는 AC-HV-014 대상기가 다른 매개체에서 발생되는 진동이나 음향신호를 누설로 오인한 사례이다. 따라서 적외선열화상 진단 결과를 병행함으로써 누설여부를 평가하는 것이 필요함을 알 수 있다.

2.2.2. 모의누설 실험결과 분석 및 고찰

Fig. 8은 2인치 글로브 밸브 내부에 시트 손상을 포함시켜 밸브 차단 상태에서 탱크압력 40 bar 상태에서 모의유체누설량을 변화시켜 누설 정도에 따른 적외선열화상 측정 결과를 나타낸 것이다. Fig. 8의 (a)는 글로브 밸브 전단 차단 게이트 밸브를 열기전, 밸브 온도가 81.3 °C에서 측정된 적외선열화상을 나타낸다. 1차 시험후 재가열 전에 촬영한 것으로 적외선 열화상에는 잔열이 남아 있음을 알 수 있으며 누설 징후가 없는 정상적인 적외선열화상으로 평가할 수 있다. Fig. 8의 (b)는 전단 차단 게이트 밸브의 개방 직후의 상태에서 촬영한 적외선열화상으로 40 bar 압력에서 누설량 ≤ 1200 ml/분 및 밸브 전단 온도 132.8 °C의 조건으로 손상 트림을 통한 누설유량 형성 초기에 측정된 것으로 밸브 전단의 차단 밸브 영역에 약간의 고온 적외선열화상(원호 표시부분)가 포착되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8의 (c)는 전단 차단 게이트 밸브의 개방 및 글로브 밸브 닫힘 지속 상태에서 촬영한 적외선열화상으로, 게이트 차단 밸브 개방후 약 29초 경과시점에서 40 bar 압력에서 누설량 1,200 ml/분, 글로브 밸브 전단 관로 표면온도 147.5 °C 및 글로브 밸브 손상 시편을 통한 전후단 전체 영역에의 누설유량 형성상태에서 측정된 것으로 차단밸브 및 글로브 밸브 전후단 모든 영역에서 노란색의 낮은 온도

적외선열화상 이미지(원호 표시부분)가 포착되고 있는 것으로 밸브누설의 초기상태인 미량누설 상태로 누설정후에 따른 조치가 필요함을 알 수 있다.

Fig. 8의 (d)는 전단 차단 게이트 밸브의 개방 및 글로브 밸브 닫힘 지속 상태에서 촬영한 적외선열화상으로, 게이트 차단 밸브 개방후 약 1분 6초 경과시점에서 40 bar 압력에서 누설량 1,200 ml/분, 글로브 밸브 전단 관로 표면 온도 169.1 °C 및 글로브 밸브 손상 시편을 통한 전후단 전체 영역에의 누설유량 형성 상태에서 측정된 것으로 차단 밸브 및 글로브 밸브 전후단 모든 영역에서 노란색과 적색의 낮은 온도와 부분적 높은 온도의 적외선열화상 이미지(원호 표시부분)가 포착되고 있는 것으로 부터 밸브누설의 진행상태로 평가할 수 있다.

Fig. 8의 (e)와 (f)는 전단 차단 게이트 밸브의 개방 및 글로브 밸브 닫힘 지속상태에서 촬영한 적외선열화상으로, 게이트 차단 밸브 개방후 약 2분 및 3분 경과시점에서 40 bar 압력, 누설량 1,200 ml/분,

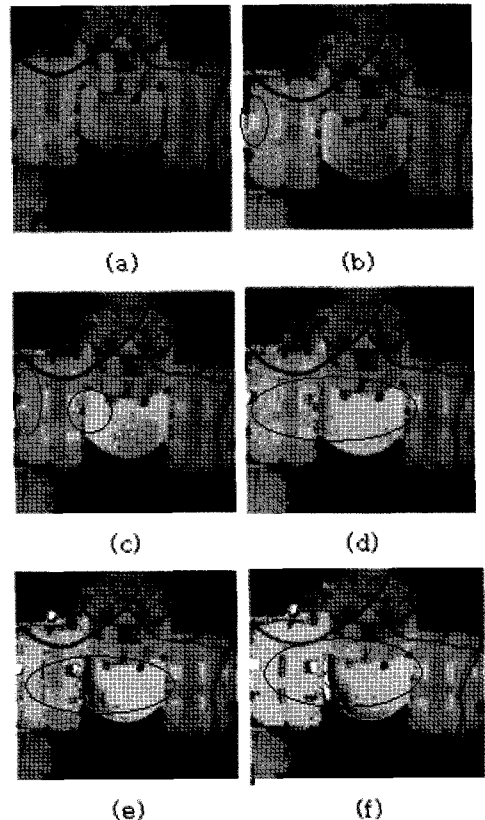


Fig. 8 Thermal image measurement results according to leakage rate increase for leakage simulation test valves

글로벌 밸브 전단 관로 표면온도 187.1 및 189.4 °C 에서 글로벌 밸브 손상 시편을 통한 전후단 전체 영역에의 누설유량 형성 상태에서 측정된 것으로 차단 밸브 및 글로벌 밸브 전후단 모든 영역에서 노란색의 낮은 온도의 적외선열화상 이미지가 포착되고 있으며, 특히 밸브 하단의 시트부분에 적색의 높은 온도의 적외선열화상 이미지(원호 표시부분)가 많이 나타내는 것으로부터 밸브 누설의 포화상태로 평가할 수 있으며, 이러한 상태는 밸브 누설에 따른 밸브 교체 또는 시트와 플러그의 보수가 필요함을 알 수 있다.

3. 결론

국내 원자력발전소 2차계통의 누설발생 또는 내부부품의 손상이 발생할 수 있는 밸브를 대상으로 다중계측방법중의 신뢰성 높은 진단 방법 개발을 위하여 적외선열화상 이미지 기법을 이용한 실험을 수행함으로써 단일계측방식의 불확실성 제거 및 향후 누설진단에 대한 확대 적용을 위하여 수행한 주요 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 현장측정 연구를 통하여, 기존 진단기법만을 이용하여 누설측정 및 평가를 수행할 경우 누설평가의 오류가 있음을 알 수 있었다. 따라서 발전소 배관 및 밸브 계통의 시스템의 특성에 대한 정밀한 분석과 함께 적외선열화상 측정결과 등에 의한 타 기법과의 결과 보완을 통해 정확한 누설상태를 평가할 수 있다.
- 2) 밸브 모의누설시험시의 유체 누설 상태에 따른 적외선열화상 이미지 측정 결과, 유체누설 조건에 따른 초기, 진행 및 포화 누설 상태의 각각의 상태의 식별이 가능하였으며 각 누설상태에 따른 누설유체량을 실험적으로 평가할 수 있었다.

발전소 현장시험 및 밸브 모의누설시험시의 밸브 누설 상태에 따른 적외선열화상 측정 실험을 통하여, 적외선열화상 측정 방법은 밸브 누설 상태의 과정을 신속하고 정밀하게 측정 가능하며 향후 많은 종류의 밸브누설진단에 활용함으로써 누설에 따른 막대한 에너지 손실 및 사고 예방의 유용한 기법으로 확대 적용에 활용 가능할 것으로 예측된다.

참고문헌

- [1] N. Kong, P. Garnaud and D. Ghaleb, "Water leak detection in steam generator of super phenix," IAEA Specialists Meeting on Acoustic/Ultrasonic Detection of in Sodium Water Leaks, Aix-En-Provence (1990)
- [2] H. Nei, "Dissolution ratio of hydrogen generated by small-leak sodium water reaction," J. of Nuclear Society and Technology, Vol. 14, No. 9, pp. 652-660 (1977)
- [3] J. Dickey, J. Dimmick and P. M. Moore, "Acoustic measurement of valve leakage rates," Materials Evaluation, Vol. 36, pp. 67-77 (1978)
- [4] H. Kaplan, Practical Applications of Infrared Thermal Sensing and Imaging Equipment, 2nd Edition, SPIE-ISOE (1999)
- [5] S. G. Lee, J. H. Park and Y. B. Kim, "Leak evaluation for power plant valve using multi-measuring method," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 28, No. 6, pp. 469-476 (2008)