

음향 영상화기법을 이용한 발전용 밸브 유체누설평가 연구 A Study on the Fluid Leakage Evaluation for Power Plant Valve Using Acoustic Imaging Technique

이상국 · 이선기 · 김대웅
S G. Lee, S. K. Lee and D. W. Kim

1. (접수일 : 2010년 5월 9일, 수정일 : 2010년 7월 13일, 채택확정 : 2010년 7월 15일)

Key Words : Valve(밸브), Acoustic Imaging(음향 영상화), Fluid Leakage(유체누설), Digital Beamforming (디지털 빔포밍), Image Processing(영상화 처리), Power Plant(발전소)

Abstract : Image processing has provided powerful techniques to extract from the acoustic signals the desired information on evaluation for leakage existence, leakage rate, and searching for leakage location, etc. The imagery NDE data available can add additional and significant dimension in nondestructive evaluation(NDE) information and thus for exploiting in applications. To extract such information the use of advanced image processing techniques is much needed. In recent years, there has been much increased use of acoustic signal image processing techniques in acoustic NDE. This approach will increase the efficiency of inspection procedures and reduce inspection time. In this paper we are concerned only with This paper is concerned mainly with the use of advanced image processing techniques in valve leakage detection and advanced image restoration and enhancement methods, which attempt to evaluate promptly by a visualization method the acoustic sources while detecting the valve leakage.

1. 서 론

고온고압 제어밸브의 내부 누설 원인중 일반적인 정비 결함을 제외하고 밸브의 내부 구조상 최소한의 틈새가 발생하면 밸브 전후단의 높은 차압으로 인해 유체가 유동하게 됨에 따라 시트의 누설이 시작되고, 이와 더불어 유체가 시트 밀봉면에 계속적인 응력을 가하여 마멸(또는 침식)이 발생하면서 내부 누설이 점차 층류 유동에서 난류 유동으로 바뀌게 된다. 내부 누설이 난류 유동으로 전환됨에 따라 급속한 압력과 속도의 변화로 캐비테이션이 발생하면서 손상은 더욱 더 급진전되는 특성을 가진다. 이러한 발전용 밸브 누설검사에는 현재까지 유량레벨 감소, 압력계를 이용한 입출구 압력차(압력감소), 온도변화 및 습도 측정, 내압(가압)시험 및 진공(감압시험) 등의 방법이 적용되어 왔으나, 미소 누설상태(누설유무, 누설율, 누설속도 및 누설형상 등)의 정보에 대한 실

시간 측정이 불가능하고 측정시의 절차의 복잡성 및 간접적인 측정에 의한 측정값의 낮은 신뢰도 등 많은 문제점이 있었다^{1~3)}. 또한 수많은 밸브, 배관 및 압력용기들이 복잡하게 배치되어 있는 발전소 현장과 같은 다중객체의 경우, 누설 위치 및 정도와 결합 상태를 한꺼번에 탐색하여 추정하기 어려우므로 현재 여러 가지 기법으로 많은 시간을 투자하여 진단을 수행함으로써 많은 시간과 비용이 소요되고 있어 정밀진단 대상을 신속하게 판단할 수 있는 정보제공을 위하여 신속한 스캔 탐지 및 이미지화기술이 요구되고 있다.

또한 음향카메라를 이용한 음향 영상화기술은 자동차, 전자제품, 일반 기계 등에서 발생하는 음향을 실시간으로 보여주는 진단기술로서, 발전소 현장에서는 누설발생 밸브의 신속한 탐색, 누설 음원의 위치 및 전파 경로 등에 대한 측정 방법이 다양하게 요구된다. 실시간 음향 영상화기술은 마이크로폰 어레이 및 카메라 컨트롤러를 이용해 누설음원 발생을 실시간으로 모니터에 보여 줄 뿐만 아니라, 음원을 주파수 특성 및 음질 특성에 따라 분리 및 구별하여 표시할 수 있어, 주로 신호분석에 의존하는 기존 방식에

이상국(교신저자) : 한국전력공사 전력연구원 원자력발전연구소
E-mail : sglee@kepri.re.kr, Tel : 042-865-5507
이선기 : 한국전력공사 전력연구원 원자력발전연구소
김대웅 : 한국전력공사 전력연구원 원자력발전연구소

부가하여 이를 시각적으로 가시화하면 누설여부 탐지 및 정밀진단을 위한 정보제공을 신속하게 수행할 수 있게 된다. 따라서 본 연구에서는 고온고압밸브에서 다양한 누설상태를 모의하고 이때 발생하는 음향을 영상화하는 측정실험을 통하여 누설상태에 따른 음향 이미지의 주파수특성 및 밸브 위치별 음원 발생분포 등을 검토하였다.

2. 실험방법 및 고찰

2.1 디지털 빔포밍 기법

측 방향 해상도를 향상시키기 위해서는 초음파변환기 어레이의 각 요소가 발사한 초음파 신호들을 물체 내의 표적위치에 동시에 도달하도록 집속시켜야 한다. 이것은 변환기 어레이의 각 요소에 전자적으로 시간지연(time delay)을 주어 선형어레이(linear array)에서 나가는 빔을 집속시킨다. 이것을 송신집속(transmit focusing)이라 한다. 반대로 물체 내 표적위치에서 반사된 초음파를 수신할 때는 Fig. 1과 같이 반사초음파는 변환기 어레이(converter array) 각 요소에 서로 다른 시간에 도달하므로 지연요소(delay element)를 거치면서 전자적으로 시간지연을 주어 시간 차이를 보정한 후 이를 모두 더하여 원하는 집속된 신호(focused signal)를 얻는다. 이것을 수신 집속(receive focusing) 또는 수신 빔포밍(receive beamforming)이라 한다.⁴⁾

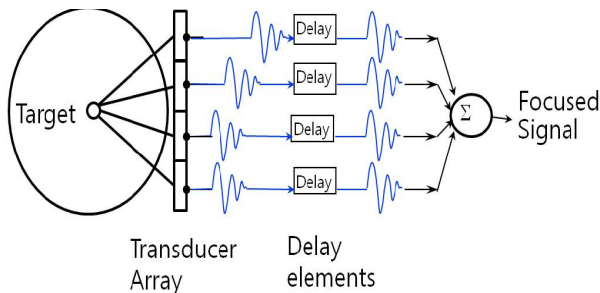


Fig. 1 Concept diagram of receive beamforming

2.2 실험방법

2.2.1 시험밸브

본 연구의 대상밸브는 현재 국내 원자력발전소 2차 계통에서 사용중인 주증기 응축수 밸브(main steam condensing water valve)이며 각 밸브에 대한 사양을 Table 1에 나타내었다. 증기계통의 응축수 배수조절을 목적으로 고온/고차압(250 °C, 차압 20 bar) 조건에서 이용되는 중요한 기기로 한번 누설 또는

고장이 발생되면 내장품의 손상이 지속적으로 확대되며 성능이 저하되고 출력손실을 야기시킨다. 또한 정상 운전중의 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.

Table 1 Specifications of the test 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

2.2.2 실험장치 및 방법

밸브의 모의누설은 Fig. 2의 고온고압 유체누설시험설비를 이용하였으며 최대 약 110 bar 및 300 °C 까지 시험이 가능하다. Fig. 3은 본 연구에서 사용된 음향 카메라 시스템(acoustic camera system)을 나타낸다. 밸브누설시의 음향영상 측정방법은 기존의 음향 가시화 시스템이 이용하고 있는 주파수분석 방식의 알고리즘과는 달리 시간영역 신호(time signal)를 이용하는 HIT(Heinz Interference Transform) 알고리즘을 적용하고 있는 GFaI사의 음향 카메라 시스템을 사용하였다.

HIT 알고리즘은 시간영역 신호를 이용하기 때문에 정상상태(stationary) 소음원의 음원과 이동 음원(moving source), 임펄스(impulse) 등의 비정상상태(non-stationary)의 소음원의 음원을 정확히 추적할 수 있는 시스템이다.⁵⁾ 또한 HIT 알고리즘은 측정된 신호를 무비(movie)로 분석할 때, 이동식 프레임(moving frame)을 샘플링율(sample rate, kS/s)의 시간 분해능(time resolution)으로 분석이 가능하여 음원의 발생 및 전달, 확산과정을 영상화하고, 각 프레임(frame)들의 이미지(image)상 위치별 주파수 스펙트럼(spectrum)과 시간신호를 플로팅(plotting) 할 수 있다. 사용된 음향 카메라 시스템(acoustic camera system)의 사양을 Table 2에 나타낸다.

발전소 현장에서 입수한 손상시험편의 손실량 산

정하는 것이 가장 선행적으로 고려되어야 할 사항에서 밸브 트림(trim)부의 손상된 플러그(plug)의 손상을 측정이 불가능한 부분을 3차원 스캔(3D scanning) 방법을 데이터 취득하여 손상율에 따른 누설특성을 고려하여 실험을 수행하였다. 고온 고압에서 손상된 밸브 시료는 육안으로는 구별 가능하나 손상된 부분의 상세 치수 및 손상율의 측정이 난해하여 3차원 스캔 시스템(3D scanning system)을 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 미세 개도율(1~5%)을 설정하고, 이를 누설조건으로 하였다.

인위적인 누설발생은 밸브 트림(trim)부의 손상된 플러그(plug)의 손상이 발생하여 누설이 발생하는 경우를 모의하였으며, 누설량은 누설형상과 밸브 출입구의 차압에 의해 변화하며 압력에 따라 비례하므로 밸브 입구압력을 변화시켜 조절하였다. 또한 밸브입구의 압력은 20 bar로 하여 Fig. 4에서 나타낸 플러그 개방부분(opening area)의 면적을 변화시켜 개도율을 1~5%의 범위로 변화시켰다.

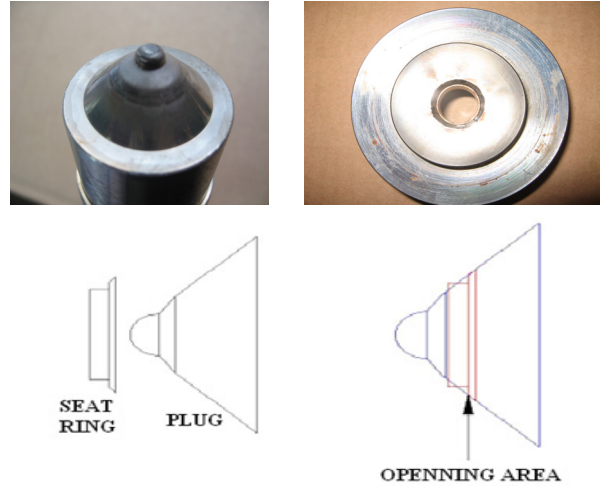


Fig. 4 Valve seat ring and plug, and leak method

Table 2 Specifications of acoustic camera system

Items	Type and specifications
Algorithm	Delay and Sum Beamforming (Time Domain)
Camera	USB Camera (1280.1024 pixels)
Number of Microphone	36ea. (Max 48)
Sample rate	12~192 kHz/channel (16bit -ADC 192 kS/s)
Buffer memory	1M samples/channel
Frequency range	100 Hz(30 Hz) ~ 100 kHz

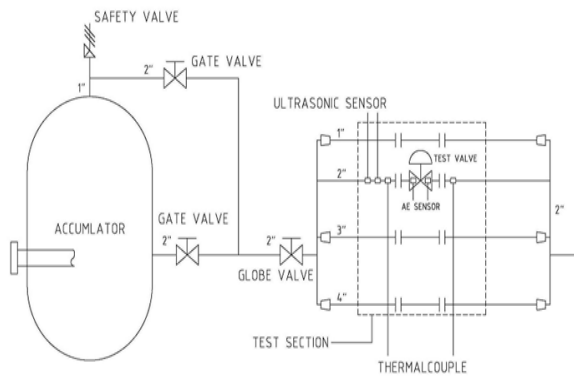


Fig. 2 High temperature-pressure leak test loop

2.3 실험결과 및 고찰

Fig. 5는 음향 카메라 시스템(acoustic camera system)을 이용하여 밸브 모의누설시험을 위한 시험 밸브를 측정된 영상 사진이다. 밸브 누설정도에 따른 음향 이미지를 밸브 위치별로 주파수성분으로 실제 밸브에 나타내었으며, 이와 함께 플러그 개방부분(opening area)의 면적을 변화시켜 개도율을 1~5% 범위로 변화시켰을 때의 주파수성분과 진폭을 측정

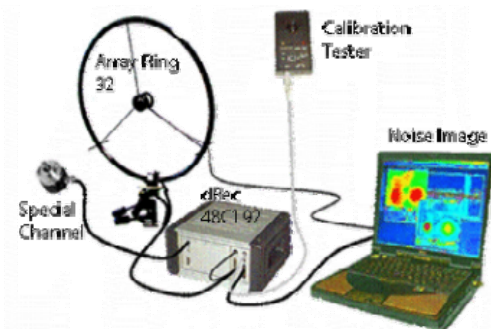


Fig. 3 Configuration of acoustic imaging system for valve leak detection

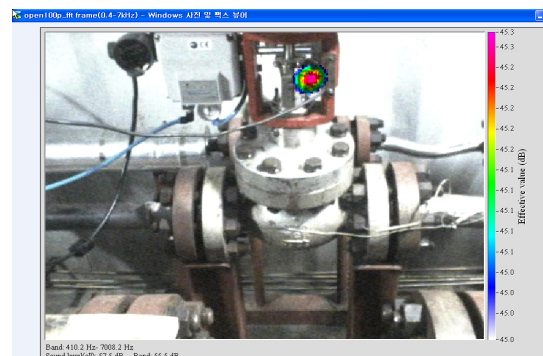
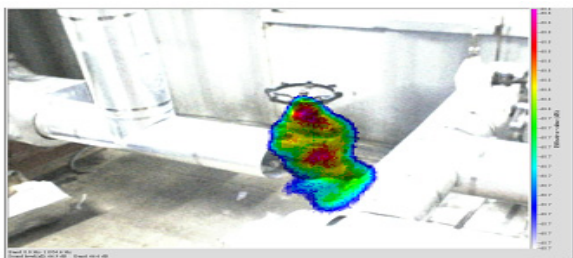


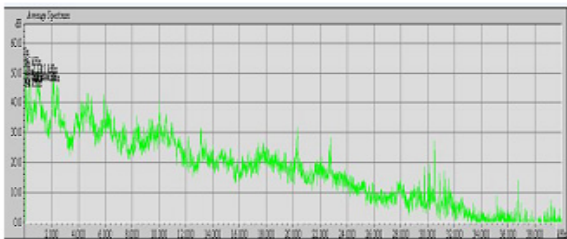
Fig. 5 Valve photography measured from the acoustic camera system

하였다. 마이크론 어레이(microphone array)와 밸브간의 측정거리는 약 1.0 m를 유지하였으며, 최대 100 kHz의 측정범위의 주파수대역을 가진 마이크론을 사용하였다.

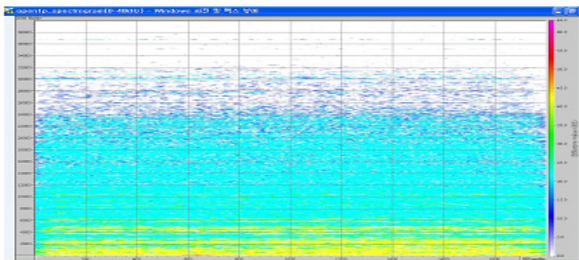
Fig. 6은 밸브 개도율을 1%로 하여 유체를 밸브 내부에서 누설시킬 때 마이크론 어레이 및 음향 카메라를 이용하여 측정된 음향측정결과를 나타낸다. Fig. 6의 (a)는 밸브 부위별 음향 레벨(sound level)의 유효 진폭값(effective value, dB)으로 나타낸 것으로, 음향레벨의 최대값은 66.9 dB를 나타내었으며, 밸브누설시의 음원의 발생 후 확산, 전파의 현상을 한눈으로 알 수 있다. Fig. 6의 (b)는 0~40 kHz의 주파수대역에서 FFT분석 결과를 나타낸 것으로, 40 kHz 전체 대역에 걸친 주파수분포를 나타내었으며 주파수의 증가에 따라 진폭이 감소하는 주파수특성을 가지고 있음을 알 수 있다. Fig. 6의 (c)는 시간영역과 주파수영역의 두 가지 영역을 동시에 나타낸 음향세기(acoustic intensity)를 표시한 음압분포도(spectrogram)이다. 전체 시간대역별로는 유사한 분포를 나타내고



(a)



(b)



(c)

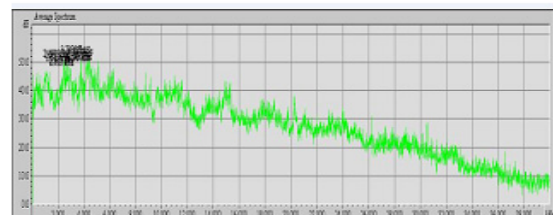
Fig. 6 Sound level, spectrum, spectrogram analysis results obtained during valve leakage test at 1% opening ratio

있으며, 고주파범위로 갈수록 낮은 진폭을 나타내는 것으로부터 개도율 1%에서 약 6 kHz 이내의 주파수 범위에서 40 dB 이상의 진폭이 많이 분포하고 있음을 알 수 있다.

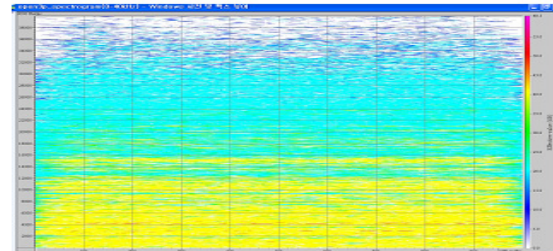
Fig. 7은 밸브 개도율을 1%에서 3%로 설정하여 유체 누설량을 증가시켰을 때의 마이크론 어레이 및 음향 카메라를 이용하여 측정된 음향측정결과를 나타낸다. Fig. 7의 (a)는 밸브 부위별 음향 레벨(sound level)의 유효 진폭값(effective value, dB)으로 나타낸 것으로, 음향레벨의 최대값은 71.8 dB로 1%에 비해 증가하였음을 알 수 있으며, 밸브상에 누설시의 음원의 발생 후 확산, 전파의 현상을 한눈으로 알 수 있다. Fig. 7의 (b)는 0~40 kHz의 주파수대역에서 FFT분석 결과를 나타낸 것으로, 40 kHz 전체 대역에 걸친 주파수분포를 나타내었으며 주파수의 증가에 따라 진폭이 서서히 감소하는 주파수특성을 가지고 있음을 알 수 있다. Fig. 7의 (c)는 시간영역과 주파수영역의 두 가지 영역을 동시에 나타낸 음향세기(acoustic intensity)를 표시한 음압분포도 (spectrogram)이다. 전체 시간대역별로는 유사한 분포를 나타내고



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 Sound level, spectrum, spectrogram analysis results obtained during valve leakage test at 3% opening ratio

있으며, 고주파범위로 갈수록 낮은 진폭을 나타내는 것으로부터 개도율 3%에서 약 20 kHz 이내의 주파수 범위에서 40 dB 이상의 진폭이 많이 분포하고 있음을 알 수 있다. 즉 개도율 1%시의 주파수에 따른 진폭분포와 비교해 보면, 3% 개도율의 경우는 고주파 및 고진폭의 신호가 수신되었음을 알 수 있다.

Fig. 8은 밸브 개도율을 3%에서 5%로 설정하여 유체 누설량을 증가시켰을 때의 마이크로폰 어레이 및 음향 카메라를 이용하여 측정된 음향측정결과를 나타낸다. Fig. 8의 (a)는 밸브 부위별 음향 레벨(sound level)의 유효 진폭값(effective value, dB)으로 나타난 것으로, 음향레벨의 최대값은 77.8 dB로 1%에 비해 증가하였음을 알 수 있으며, 밸브상에 누설시의 음원의 발생 후 확산, 전파의 현상을 한눈으로 알 수 있다. Fig. 8의 (b)는 0~40 kHz의 주파수대역에서 FFT분석 결과를 나타낸 것으로, 40 kHz 전체 대역에 걸친 주파수분포를 나타내었으며 주파수의 증가에 따라 진폭이 서서히 감소하는 주파수특성을 가지고 있음을 알 수 있다. Fig. 8의 (c)는 시간영역과 주파수영역의 두 가지 영역을 동시에 나타낸 음향

세기(acoustic intensity)를 표시한 음압분포도(spectrogram)이다. 전체 시간대역별로는 유사한 분포를 나타내고 있으며, 고주파범위로 갈수록 낮은 진폭을 나타내는 것으로부터 개도율 5%에서 약 20 kHz 이내의 주파수범위에서 40 dB 이상의 진폭이 많이 분포하고 있음을 알 수 있다. 즉 개도율 3%시의 주파수에 따른 진폭분포와 비교해 보면, 3% 개도율의 경우와 발생하는 주파수에 따른 진폭범위는 유사하나, 음향세기(acoustic intensity)가 더욱 강한 신호가 수신되었음을 알 수 있다.

3. 결 론

발전용 고온고압밸브에서 다양한 누설상태를 모의하고 이때 발생하는 음향을 영상화하는 측정실험을 통하여 누설상태에 따른 음향 이미지의 주파수특성 및 밸브 위치별 음원 발생분포 등을 실험적 검토를 통하여 얻어진 연구결과는 아래와 같다.

1) 밸브 누설량의 증가에 따라 음향레벨의 최대값은 증가함을 알 수 있으며, 밸브표면상에 누설시 음원의 발생 후 확산 및 전파 현상을 확인할 수 있다.

2) 시간영역과 주파수영역의 두 가지 영역을 동시에 나타낸 음향세기(acoustic intensity)를 표시한 음압분포도(spectrogram) 평가로부터, 고주파범위로 갈수록 낮은 진폭을 나타내며 개도율이 증가할수록 즉 누설량이 증가할수록 상대적으로 높은 주파수 및 높은 진폭을 갖는 신호가 측정되었다.

3) 밸브 누설시 표면에 음원의 발생, 확산 및 전파의 현상을 확인할 수 있으므로, 발전소 현장 진단시 기존 측정방법을 대체할 수 있는 신속한 진단기법으로 활용 가능할 것으로 판단된다.

4) 디지털 빔포밍 기술을 이용한 밸브 누설량에 따른 음향 레벨(sound level)의 최대 진폭값, 주파수 분포 및 음향세기 등의 변수들을 측정하여 누설상태별로 데이터베이스를 구축한다면 향후 발전설비의 건전성평가에 활용도가 높을 것으로 생각한다.

참고 문헌

1. Sang-Guk Lee, 2004, "Nondestructive Testing and Applications for Electric Power Plant Equipments by Acoustic Emission Technology", Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 24, No. 4, pp. 396~409

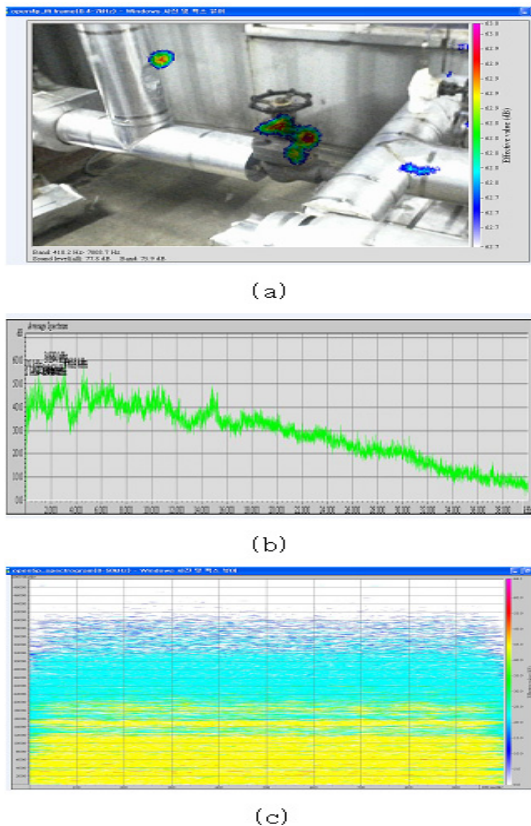


Fig. 8 Sound level, spectrum, spectrogram analysis results obtained during valve leakage test at 5% opening ratio

2. Allen, J. W., Hartman, W. F. and Robinson, J. C., 1988, "Acoustic Monitoring of Power Plant Valves" , EPRI NP-2444, pp. 22~30.
3. Sang-Guk Lee, Dae-Woong Kim, Yang-Seok Kim and Hun Jeong, 2009, "Study on Statistical Analysis of Measured Fluid Leakage Data and Estimation of the Leakage Rate for Power Plant Valve", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 13, No. 5, pp. 59~66.
4. 초음파 영상진단기의 기술동향, 2006, Innonet Webzine, J. Innonet Webzine, Vol. 140, No. 1.
5. SV Corp., 2006, Listening with the Eyes, Acoustic Camera, SV Corp. System Manual, pp. 1~9.