



# 특집

국내 전력기기의 소음진동 동향

## 발전설비 플랜트 및 기자재 소음진동 연구 동향

김 철 홍\*

(두산중공업 기술연구원)

### 1. 머리말

일반적으로 발전설비산업은 전기를 생산하는 발전설비(전력설비)를 제작 및 공급하는 산업을 의미한다. 규모의 중후 장대함, 기술의 복잡성, 고도의 이론과 경험적 기술이 요구되는 점 때문에 기술적 파급 효과가 매우 큰 산업이기도 하다.

70년대 이전의 대출력/고효율, 80년대의 환경친화, 90년대의 대출력/고효율/환경친화 등으로 변천된 사회적, 경제적, 기술적 요구에 성공적으로 대응하면서 발전하여 왔으며, 21세기 들어서는 유한한 화석연료의 효과적인 사용, 화석연료의 사용에 따른 공해물질 배출 저감 문제와 결합되어 고효율 발전설비 산업이 등장하게 되었다.

고효율 발전설비는 발전소의 경제적인 운용과 연계되어 효율 향상, 출력증대를 위한 새로운 기술의 개발 및 적용이 이루어지고 있다. 1980년대 이후 열효율 개선을 통한 증기터빈의 효율 향상시키기 위해 증기조건의 개선에 관심이 증가하게 되었고 일본과 유럽의 경우, 발전설비 제작사와 정부의 주도하에 기술개발을 통하여 증기조건을 점진적으로 고온·고압화 되고 있다(그림 1).

또한, 출력 관점에서 최대 출력은 1930년대 이후 지속 증가해 왔으며, 1980년대를 기점으로 그 규모가 대형화 되면서 출력이 급속하게 증가되고 있는 경향(국내/해외: 최대 1700MW급/1900MW급)을 보이고 있고, 이러한 추세에 대해 설비 기자재 설계/제작 관점에서 소음/진동 이슈는 고온/고압 환경하

에 노출된 소음/진동원에 대한 회피/저감을 위한 더 많은 연구개발이 필요한 환경에 놓여져 있다.

이 글에서는 이와 같은 배경 하에서 발전설비 플랜트 및 기자재 제작/공급업체로서 기기에 대한 소음/진동 이슈 중심으로 현황과 앞으로의 연구동향에 대해 간략하게 언급하고자 한다.

### 2. 발전설비 소음진동 연구

화력발전소의 주기기는 화석연료를 연소시켜 물을 고온·고압 증기로 바꾸어 열 에너지를 생성시키는 보일러, 고온·고압의 증기를 날개에 분사하여 로터를 회전시켜 열 에너지를 운동 에너지로 변환시키는 터빈, 로터의 운동 에너지를 전기 에너지로 변환시키는 발전기 및 부속 기기를 일컫는다. 500MW급 발전용 보일러는 매 시간당 350톤의 석

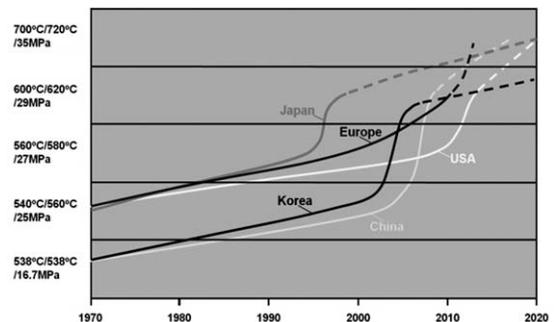


그림 1 화력발전소의 증기온도 상승 동향  
(Sources: COORETEC-Meeting during Enertec 2005, Siemens PG)

\* E-mail : cheolhong.kim@doosan.com / Tel : (055) 278-3713

탄을 연소하여 생성되는 증기가 약 1720톤에 이르는 규모이고, 무게 250톤의 터빈/발전기는 날개 끝의 증기 충돌속도가 음속의 1.9배인 640 m/sec이며, 로터의 회전속도가 3600 rpm에 달하는 초대형 정밀 기기이다.

원자력발전소의 주기기는 화력발전소의 보일러에 해당하는 reactor vessel과 steam generator 및 reactor coolant pump으로 구성된 1차 계통과 발생한 증기를 운동 및 전기에너지를 변환하는 터빈 발전기 및 부속기기로 이루어져 있다. 출력은 대개 호기당 1000MW급 이상으로 최대 1900MW급 까지를 생산되고 있다.

가스터빈 발전으로 가장 대표적인 복합화력은 가스터빈과 증기터빈을 동시에 사용하여 전기를 생산하는 발전소를 말하며, 출력은 1MW로부터 수백 MW에 이른다. 효율증대를 위해 가스발전엔 배열 회수 증기 발생기(HRSG, heat recovery steam generator)를 사용하고 있으며, 주연료인 천연가스를 연소하여 발생한 고압고온 가스로 가스터빈을 회전시키고, 배열을 이용하여 증기터빈을 회전시킴으로써 일정량의 전기를 생산한다. 통상 복합화력은 화력이나 원자력 발전에 대해 중간부하 혹은 첨두부하용 발전소로서 역할을 담당하고 있다.

이외 20기압 수준의 가압조건에서 석탄을 연소시켜 생성된 스팀으로 기존의 스팀터빈을 구동하고 고온고압 연소배가스로는 가스터빈을 구동하는 가압유동층연소발전(PFBC)도 있으며 석탄을 직접 연소하는 것아니라 고온고압에서 가스화한후 가스를 연소하는 복합화력 발전 방식인 석탄가화복합발전시스템(IGCC) 등이 있다.

또한, 신재생에너지로 최근 주목받고 있는 대형(3MW급 이상) 풍력발전 시스템과 연료전지, 태양열 발전 등도 발전설비로서 주요한 기기로 생산되고 있다.

이와 같은 다양한 형태의 발전설비에 대해 이를 구성하는 각종 주기기와 부속기기 이를 연결하는 시스템에서 이를 흐르는 작동매체의 형태에 따라 소음진동 문제는 다양한 형태로 나타나고 이를 회피/저감하기 위한 설계/제작, 시운전, 운전 단계별로 해결해야 하는 중요한 기술 분야이다.

특히, 최근 발전설비 관점에서 시장에서 가격경쟁력을 갖추기 위해서는 설비나 기기의 고효율화,

대형화, 고집적화 등이 요구되고 이에 따라 기기 신뢰성 관점에서 소음진동 이슈는 기술적 관점에서 단순 진동해석을 통한 수동적 회피에서 벗어나 보다 정확한 물리적 현상의 구현을 통해서 능동적으로 제어하기 위한 고도의 기술역량을 요구하고 있다.

## 2.1 대형 화력 보일러 소음진동 연구

대형 보일러는 고효율, 성능개선 등에 대한 고객 요구 증가와 치열해져 가는 발전 시장에서 경쟁력을 유지하기 위해서는 성능 및 안전성이 보증되는 보일러의 개발이 절실히 요구되고 있다. 또한 운전 에 영향을 주는 여러 소음진동원에 대한 분석 및 구조물의 정/동적 안정성/신뢰성 평가 기술의 확보는 보일러 설비 공급업체로서 매우 중요한 문제이다. 보일러를 구성하는 시스템에서 발생하는 것 소음진동 이슈는 대개 다양한 형태(water/steam/air)의 작동유체가 빠른 유속을 가지고 흐름에 따라 발생하는 유체여기진동 현상이 다수를 차지한다. 상대적으로 유연한 구조물에 대한 high Reynold's No., unsteady, separated flows 등으로 인해 발생하기 때문에 이에 대한 지속적인 연구가 이루어지고 있다.

### (1) 튜브군의 음향공진 현상 및 회피 방안

보일러에는 열교환을 위해 많은 튜브군이 설치되어 있다. 설치된 튜브 내부에는 액체상태의 물이나 증기와 같은 저온 상태의 유체가 흐르고 튜브외부에는 고온상태의 연소가스가 흐르게 되어 튜브내부 유체에 열을 공급하게 되며 열전달 효율을 증가시키기 위해 튜브 배열, 튜브 형상 등을 정하게 된다. 튜브와 수직방향으로 유동하는 연소가스는 튜브를 지나면서 튜브주변으로 와류를 유발하게 된다. 와류주파수가 튜브를 구성하고 지지하는 덕트공동(duct cavity)의 음향고유주파수와 일치할 경우 음향공진을 유발하게 된다.

음향공진 현상은 다양한 튜브형태와 배열을 가진 여러가지 열교환기에서 광범위하게 나타나는 현상이며 매우 큰 진동과 소음을 발생시켜 구조적인 파손이 일어나거나 과도한 소음 문제를 야기한다. 이와 같이 관군내의 튜브는 유동에 의해 항상 진동할 수 있는 환경에 있다. 따라서, 튜브손상과 운전안정성 확보를 위해서는 설계 단계에서 음향공진의 발

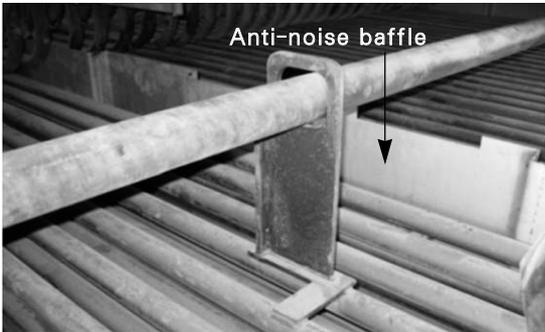


그림 2 Installation of anti-noise baffle

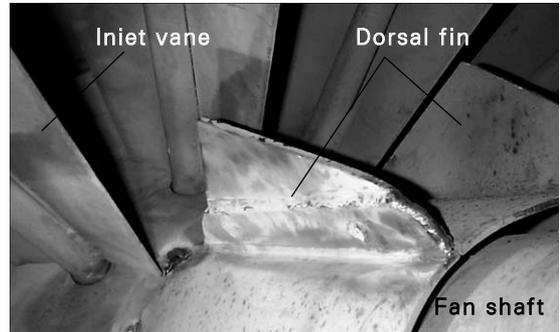


그림 3 Dorsal fin set-up

생 여부를 예측, 평가하여 적절한 방지 대책을 세워야 시간적 경제적 손실을 방지할 수 있다.

대형 화력 보일러 기기에서는 이와 같은 튜브군에서 음향공진 발생시 진동과 소음특성을 해석적 방법과 실험 검증을 통하여 확립된 절차로 사전에 예측하고 있으며, 발생시 저감대책으로 공동(cavity)의 음향 모드를 변경하기 위하여 anti-noise baffle을 설치하여 평균적으로 진동은 약 90%, 소음은 약 20 dB(A)의 저감 효과를 보고 있다.

### (2) Fan-duct 시스템의 유체유발 진동

연료를 연소시키기 위한 공기 및 연소된 가스를 골똥으로 배출시키기 위한 기능으로 대형 웬과 덕트를 사용한다. 웬 주변에 위치한 덕트는 웬에 의한 다양한 가진력에 노출되어 심할 경우 진동으로 인하여 피로손상을 야기하여 전력 생산에 심각한 영향을 미치기도 한다. 일반적으로 대형 웬은 특화된 업체로부터 구매하여 설비를 구성하는 것이 일반적인 방법이다. 그러나, 보일러 설비 공급업체 관점에서는 대형 원심형 웬 및 덕트에서 발생할 수 있는 진동에 대해 여러 현상을 이해하고 사전에 예방하는 것이 중요한 기술적 검토사항이 된다.

대표적인 예로 실제 500 MW 발전용 보일러에서 연소를 위한 primary air를 공급하는 대형 원심형 웬과 연결된 덕트 시스템에서는 웬 내부의 복잡한 와류에 의해 발생하는 압력맥동으로 인해 웬 출구측 덕트에서 최대 2000 um의 고진동으로 심각한 피로손상을 야기하기도 하였다. 이는 웬 공급업체가 국산화 과정에서 원심 웬에서 발생하는 고유한 와류현상을 brake해야하는 주요 device(Dorsal fin, 그림 3 참조) 누락으로 인해 보일러 전체 기자재공급에 지

대한 영향을 끼치게 된 경우이다.

### (3) 화로 연소현상에 의한 진동 현상

일반적으로 보일러는 효율적인 연소와 NOx 등 오염물질 배출을 저감하기 위하여 연소기(burner)에서 난류 유동을 생성시킨다. 따라서 연소로(furnace) 내부에는 연소기에서 발생된 난류 유동에 의해 압력맥동(pressure pulsation)이 필연적으로 수반된다. 결국, 이 압력맥동이 보일러의 연소로 진동을 유발시키는 가진원으로 작용한다. 특히, 압력맥동이 보일러 연소로 및 windbox와 같은 공동을 가지는 구조물 내부의 음향 정재파(standing wave)와 일치할 경우, 보일러는 특정 부하 또는 특정 운전 모드에서 공명(acoustic resonance)을 일으켜 압력맥동이 증폭되어 보일러 구조물 전체를 과도하게 진동과 소음을 야기시킬 수 있다

보일러의 연소 진동을 야기시키는 가진 메커니즘은 이상 난류 흐름(two phase turbulent flow), 불안정 화학적 반응, 열음향 진동(thermoacoustic oscillation) 등과 같은 복잡한 물리적 현상과 연관되어 있어 이론적으로 접근하기는 매우 힘들다.

그러나, 이 복잡한 현상에 대한 이해 및 규명은 최근에 기술적으로 진보된 연소해석 역량과 보일러 및 연소기 설계 제작사가 보유한 Lab 차원의 시험설비와 full-scale 연소 시험설비 등을 활용하여 예측할 수 있는 프로그램을 개발하고 현장 실증시험을 통해서 검증하여 후속 호기의 이슈에 대응하고 있다.

### 2.2 대형 화력 증기터빈 및 발전기 진동 연구

발전설비에서 핵심 회전기기는 대형 증기터빈과 발전기가 대표적이다. 차세대 터빈/발전기 분야에

서는 고온 대용량화에 따른 안전설계 기술, 터빈 성능향상에 직결되는 advanced vortex 이론을 도입한 고효율 날개 설계 및 제작에 필요한 진동 해석 기술과, 회전체용 베어링과 seal 설계에 의한 성능향상과 운전 중의 신뢰성을 높이는 동특성 및 안정성 해석 기술 및 대형 발전기를 구성하는 주요 구성품의 공진 회피 설계 기술 등에서 다양한 형태의 진동 연구들이 수행되고 있다.

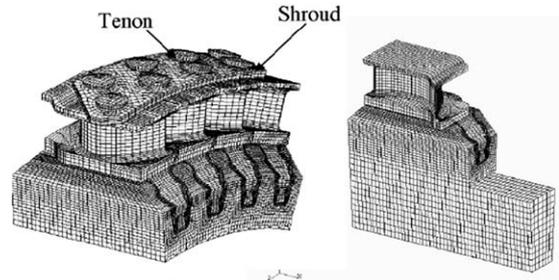


그림 4 고압단 1단 버켓 및 FE 모델(MHI)

#### (1) 대형(500MW~) 증기터빈 및 발전기 진동연구 동향

500MW급 이상의 대형 증기터빈은 플랜트 전체의 cycle 열효율을 개선하기 위해 1980년대 이후 최근 초초임계압(24.1MPa/566/593℃)까지 증기조건의 개선에 관심이 증가되고 있으며, 새로운 소재의 개발 및 소재 제작 기술의 향상과 더불어 새로운 기술을 적용함으로써 증기터빈 성능향상이 더욱 가속화 되고 있다. 최근 Siemens, Alstom, MHI, 두산중공업 등 대형 제작사에서는 700℃ 이상의 증기조건에 최적화되어 있는 증기터빈을 개발하고 있다. 또한, 효율향상과 더불어 출력 관점에서도 대용량을 구현하려는 노력을 기울이고 있으며, 이에 필수 불가결한 최종단 긴 버켓(last stage bucket, 60 Hz 45" LSB, 50 Hz 54" LSB)의 개발과 터빈 배열 최소화, 대형 발전기 개발 등을 통하여 단위 면적당 최대의 출력과 효율을 내기 위한 기술개발 노력들이 이루어지고 있다. 이와 같은 대출력화, 고효율로 인하여 대형 회전기기인 터빈과 발전기의 기기 신뢰성 및 운전 안정성과 연관된 진동 문제는 보다 엄밀한 해석과 대규모의 시험을 요구하고 있다.



그림 5 저압터빈 outer casing FE 모델

증기터빈은 일반적인 60 Hz 전기주파수에 대해 회전속도는 3600 rpm, 원자력은 1800 rpm으로 회전하게 되고, 기기를 구성하는 본체는 기본적으로 공진에 대해 회피하도록 설계되어 있다.

회전부(rotating part)의 대표적인 구성품인 블레이드는 고압단 1단 버켓의 길이가 약 50 mm에서 시작되어 최종단에서는 약 1,140 mm로 길이로 이루어져 있다. 용도, 용량에 따라 폭, 길이, 버켓 간의 연결구조, 로터의 연결 구조 등 넓은 범위에서 사용되고 있다. 여기서 고려되는 구조 강도와 진동 관점에서 신뢰성 해석은 정적 응력과 진동 응력으로 크게 나눌 수 있다. 정적 응력은 대부분 원심력에 의한



그림 6 Steel longer last stage bucket

인장, 굽힘 응력이며 편심, 비틀림 응력과 증기력에 의한 굽힘 응력이 있으며, 진동 응력은 공진 응력, NPF(nozzle passing frequency, 수kHz~수Hz)와 공진, 발전기 출력의 토크 언밸런스에 의한 비틀림 진동, 최종단 긴 버켓의 저부하 저진공 영역에서 발생하는 자력진동 응력 등이 있다. 이와 같은 다양한 응력에 대해 경험식, FE 해석법을 통해 보다 엄밀한 해석들을 수행하여 기본적으로 공진회피를 통한 응력

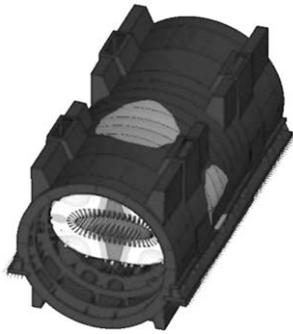


그림 7 진동해석용 프레임 및 고정자 철심 FE 모델

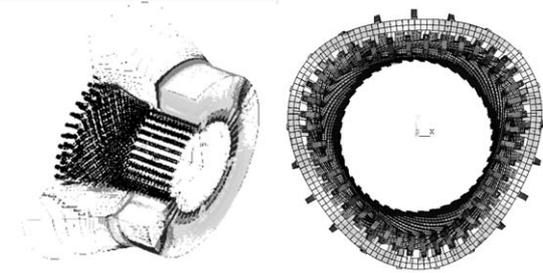


그림 8 발전기 권선단부 magnetic flux density 해석 (가진력) 및 진동 모드해석

의 최소화를 구현하고 공진이 될 경우 응력 레벨을 저하시켜 충분한 강도를 가지도록 하고 있다. 해석적으로 표현하기 어렵거나 검증의 목적으로 실제 full-scale 또는 sub-scale mock-up 모델을 실제로 제작하여 거대한 실증 시험설비에서 전 출력(full-range) 부하실험을 통하여 요구하는 정밀도를 구현하고 있다.

로터로 대변되는 터빈/발전기 축계(full-train, HP-IP-LP-generator rotor)의 진동해석 기술은 1970년대 부터 급속히 발달되었다. 그 결과 위험속도, 언밸런스 응답해석 정밀도는 상당한 수준까지 향상되었으며 축계의 대형화와 더불어 커플링의 기하학적 정밀도 불량에 의한 진동응답과 출력 전범위의 과도 진동응답, 발전기의 극수에 의한 비대칭 진동, 로터 균열에 의한 응답까지 해석적으로 구현할 수 있는 수준에 이르고 있다. 또한, 터빈-발전기의 단락에 의한 비틀림 진동, 전력계통 부하의 불평형에 의한 정상 비틀림 진동 등과 관련된 축비틀림 진동 기술도 연구가 진행되어 상세한 계산도 가능하여

축계설계에 활용하고 있다. 더불어 로터 밸런싱 기술도 같은 이슈로 발전을 거듭하여 진동해석과 같은 기술수준으로 발전되었다.

대형 발전기는 냉각 매체의 종류에 따라 공기냉각 방식, 수소냉각 방식, 수 냉각 등으로 분류되고 일반적으로 냉각효율에 따라, 200 MW 이하는 공기 냉각으로 400 MW까지는 수소 냉각, 그리고 400 MW~1600 MW급에는 수 냉각방식을 적용하고 있다.

발전기 특성상 고유한 특성인 전자기적인 현상으로 인해 설계 시 반드시 고려해야 하는 것들은 앞에서 언급한 절연, 냉각 시스템 및 구조적인 건전성 등이 있다. 발전기를 구성하는 여러 기계 부품들은 부하 변동 시의 열 팽창과 수축에 기인한 thermal expansion force, 갑작스러운 단락이나 위상 비동기(synchronizing out of phase)에 의한 불규칙적이고 순간적인 fault force와 고정자 권선의 전류와 권선 내의 자기력의 상호작용 때문에 생기는 running force 등에 대한 정확한 규명은 발전기의 내구성과 운전 중의 파손 방지, 유지 보수의 최소화를 위하여 반드시 필요하다. 특히, 전자기력에 의한 발전기의 동특성 규명은 신뢰성 있는 발전기 설계를 위해 반드시 고려해야 하는 중요한 문제이다.

발전기의 로터와 고정자 사이에서 발생하는 전자장에 기인한 전자기력으로 말미암아 발전기 전체 구조물은 물론 구성품들에서 정적인 변형이 발생하며, 실제 운전 중일 경우에는 로터의 회전으로 인하여 전자장 역시 회전하므로 발전기는 동적인 힘을 주기적으로 받게 된다. 이 전자기력은 2극 발전기 경우에 로터의 정격 회전수 3600 rpm의 2배에 해당하는 120 Hz의 가진 주파수를 가지게 되고, 발전기 구조물들의 고유진동수는 이 가진 주파수에서 일정한 주파수 분리 여유를 갖도록 설계된다.

(2) 가스터빈 소음/진동 연구 동향(소형 GT을 중심으로)

가스터빈은 사용용도에 따라 발전용, 산업용, 항공용으로 구분할 수 있으며, 이중 발전용은 전기사업자의 첨부부하용과 중간 및 기저부하용의 대용량 가스터빈 복합발전, 열병합 발전이 있다.

가스터빈은 터빈입구온도가 수천도에 이르는 고온 가스에 의해 구동되는 수만 RPM의 고속 회전기

기이다. 터빈입구 온도를 높여 열효율을 향상하는 노력으로 내열재료의 개발과 블레이드의 냉각기술의 개선에 초점을 둔 기술개발이 지속적으로 이루어지고 있다. 이와 병행하여 고속 회전체의 블레이드 진동과 로터 축계, 압축기 흡입 소음, 연소기의 배기 소음 등의 이슈를 해결하기 위한 기술개발이 이루어지고 있다.

두산중공업이 개발한 5MW급 발전용 가스터빈은 운전속도가 1000 rpm으로서 고속 조건으로 설계되었으며, 압축기, 터빈의 블레이드는 해당 운전속도까지 다양한 주파수에 노출되어 있어 공진에 의한 파손을 사전에 예방하기 노력이 반영되어 있다. 또한, 대형 발전용 가스터빈은 로터의 각 요소를 냉각하기 위하여 중공축을 사용하거나 디스크에 타이 볼트를 체결하여 디스크 로터를 구성한다. 이에 따라 축이 유연해짐에 따라 정격 운전속도에 도달할 때까지 3~4개의 위험속도를 통과하게 된다. 이를 기술적으로 해결하기 위하여 연결되는 발전기에 고정 커플링(rigid coupling)을 사용하고, 운전 중 축계에 발생하는 열굽힘 변형 등에 의한 위험속도 저하를 보다 정밀하고 체계적으로 조정하기 위한 설계 민감도 해석 등을 수행하여 활용하기도 한다.

이외 가스터빈의 소음은 대부분 작동유체의 고속 흐름에 기인하여 발생하는 압축기 흡기축 소음과 연소가스 분출에 의한 배기축 소음이 주류를 이루며, 소음기나 방음벽 설치를 통하여 near-field 소음을 방지하고 있다.

### 2.3 원자력 구조물 유체 유발진동 연구 및 플랜트 대형 펌프 및 배관 진동

이외에도 원자력 발전에서는 원자로의 건전성은 원전 안전성에 가장 중요한 요소이며, 건전성 검증을 위한 주요 설계 검증방법 중 하나로서 미국원자력규제위원회(US NRC) 규제지침에 근거하여 원자로내부구조물 종합진동평가프로그램(CVAP, comprehensive vibration assessment program)으로 원전의 설계 수명기간 중 원자로 냉각재의 유체유발진동(flow-induced vibration)에 의한 내부구조물의 건전성을 확인하는 노력으로서 해석과 검증 시험 등이 이루어지고 있으며, 그 대상 기기는 점차적으로 확대되어 가고 있는 추세이다.

또한, 화력/복합화력 플랜트를 구성하는 보조설

비로서 대형 펌프류 및 배관에 대한 소음/진동 이슈도 다수 발생하고 있으며, 발전설비를 EPC(engineering procurement and construction)로 공급하는 두산중공업 관점에서는 구매품에 해당하는 기기에 대한 근원적 소음진동 소스 파악과 관련된 연구에 대한 많은 노력들을 기울이고 있다.

### 2.4 IT 융합 소음진동 감시/진단 시스템

최근에는 발전설비 플랜트 가동상황 설비 진단 기술을 이용하여 설비 가동률 극대화과 비상정지 손실 최소화를 위해 설비나 기자재에 대해 단순 기능위주의 감시기능에서 발달하는 IT기술과 접목하여 지속적인 설비 감시/진단을 통한 설계개선 사항 도출을 통해 고객 신뢰도 향상에 필요한 모니터링 시스템 개발에도 노력하고 있다. 세계적인 발전설비 공급업체인 GE나 Siemens, Alstom 등도 복합화력 발전플랜트 우선적으로 다양한 solution을 제공하기 위한 사업적 모델을 적용하고 있으며, 향후 기술개발과 더불어 화력 발전설비로 확장에 힘쓰고 있다.

따라서, 발전설비 기자재 및 플랜트 설계, 제작, 설치, 운전, C/S 등에서 다양한 형태로 발생하는 소음/진동 이슈에 대한 체계적이고 시스템적으로 DB화하고 설계 데이터 기반 현장 운전 데이터를 활용하여 설비 진단, 고장예측 등에 대한 응용에 많은 사업적/기술적 기회가 있을 것으로 예측된다.

## 3. 맺음말

이상과 같이 발전설비 기자재 공급자 관점에서 주요기자재에 대한 소음진동 연구동향을 간단하게나마 알아보았다.

발전시장은 연료비 증가, 부지의 부족 등으로 인하여 발전소의 경제성에 관심이 증가하게 되었고, 환경규제 및 효율향상, 출력 증가 등의 요구조건을 충족시키기 위해 지속적으로 새로운 기술의 개발이 이루어지고 있으며, 효율/출력 증가와 필수 불가결하게 동반되는 제품의 신뢰성 확보를 위한 소음진동 회피/저감 기술에 대한 요구가 꾸준히 증가하고 있어 지속적인 개발과 관심이 필요할 것으로 생각된다. **KSNVE**