

## 가청화를 이용한 댐 수차 발전기소음의 저감효과 평가

설 수 환, 주 덕 훈\*, 김 재 수†

\*원광대학교 대학원 건축공학과, 원광대학교 건축학부

### Evaluation on Reduction Effect about Noise of Hydraulic Turbine Dynamo in Dam using Auralization

Soo-Hwan Soul, Duck-Hoon Ju\*, Jae-Soo Kim†

\*Department of Architectural Engineering, Graduate School, Wonkwang University, Iksan, Korea  
Division of Architecture, Wonkwang University, Iksan, Korea

(Received March 11, 2008; revision received May 20, 2008)

**ABSTRACT:** Multipurpose Dam, it produces electric energy by converting the potential energy into kinetic energy utilizing its head and quantity of the water. However, in this process, since during the time when the turbine connected to the hydraulic turbine generator revolves, there occurs a ceaseless loud noise, and due to this condition, it is true state that those people who work at inside of the power plant are damaging as hard as they are unable to concentrate on their work. Not only this, because the hydro-electric power generator room that locates at middle section between the hydraulic turbine room and the office is very large space volume, also since it was constructed chiefly by the reflecting material, it is functioning of amplify the noise when operating the generator, the soundproof measure against this condition is necessitated. On such viewpoint, I have presented the problem point of the relevant Hydraulic turbine dynamo and Hydraulic turbine dynamo room, and after improve such problem point, this study has ever investigated the satisfying degree about the noise-reduction at before and after of the improvement of soundproof measure, using the Auralizational technique that can experience virtual acoustic field. It is considering that such result could be utilized usefully as the fundamental material hereafter for the acoustic performance of the hydro-electric power generator room in dam and when its construction.

**Key words:** Hydraulic Turbine Dynamo Room(수차발전기실), Auralization(가청화), Psycho-acoustic Experiment(청감실험)

### 1. 서 론

국내의 경우 1965년 섬진강댐을 시초로 홍수조절·수력발전·관개(灌溉)·상수(上水)·공업용수

공급 등의 역할을 하는 14개의 다목적댐을 건설하였다. 이러한 다목적댐의 경우 물의 낙차와 양에 의한 위치에너지를 운동에너지로 전환하여 전기에너지를 생산하게 된다. 그러나 이 과정에서 수차 발전기에 연결된 터빈(turbine)의 회전시 끊임없는 고소음을 발생시키고 있으며, 이로 인해 발전소 내부에서 일하는 사람들이 업무에 집중할 수 없을 정도로 많은 피해를 입고 있는 실정이다.

† Corresponding author

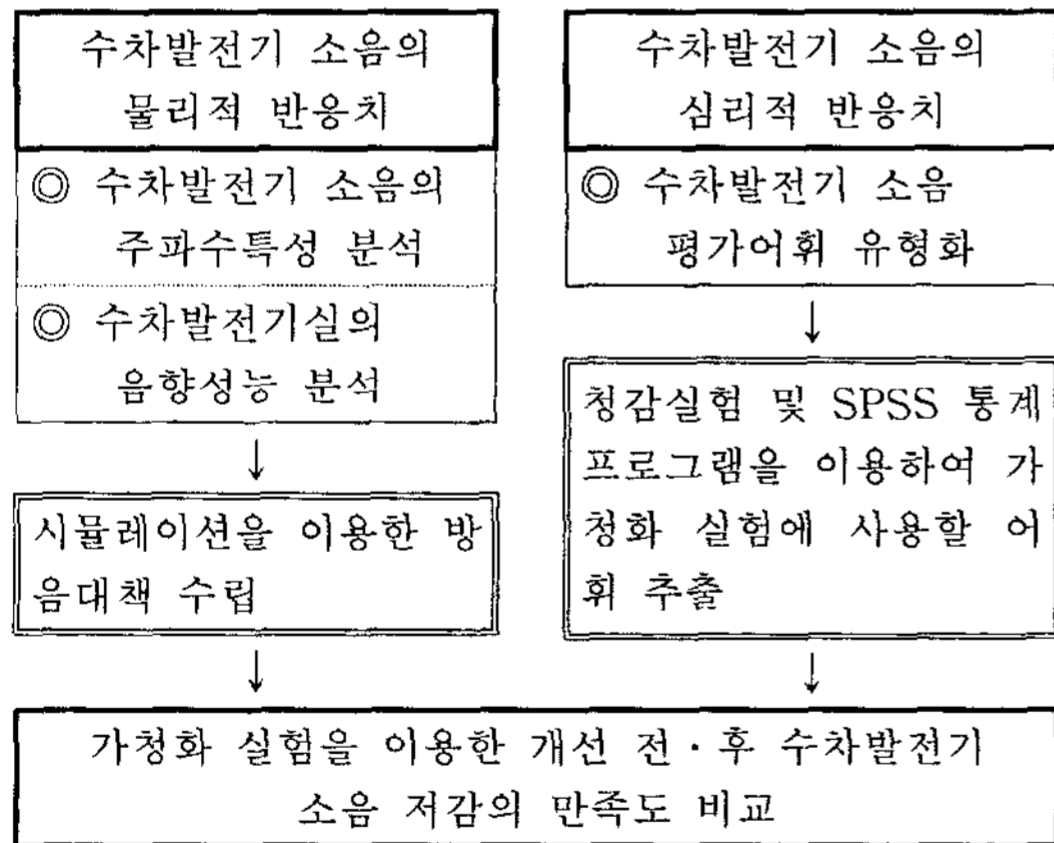
Tel.: +82-63-850-6712; fax: +82-63-843-0782

E-mail address: soundpro@wku.ac.kr

뿐만 아니라, 수차실과 사무실 중간에 위치한 수차발전기실은 체적이 매우 크고, 반사재 위주로 마감되어 있어 발전기 작동시 발생하는 소음을 증폭시키는 역할을 하고 있기 때문에 이에 대한 방음대책이 필요하다.

이러한 관점에서 본 논문에서는 시뮬레이션을 이용하여 고소음을 저감할 방안을 제시하여 보았다. 그 결과 인접한 사무실에 전달되는 수차발전기의 고소음을 크게 저감할 수 있었지만 이러한 결과는 물리적인 평가요소를 낮추는데 초점이 맞춰져 있어 실 근로자들에게 어느 정도 저감효과를 나타낼지 알 수 없기 때문에 설계단계에서 실이 완성된 후의 음장을 직접 체험할 수 있는 가청화 기법을 이용하여 소음 저감에 대한 만족도를 평가해 보고자 하였다. 이러한 결과는 향후 유사한 댐 수차 발전기실의 음향 성능 및 시공시 기초자료로 유용하게 사용될 것으로 사료된다.

2. 연구의 흐름



본 연구에서는 수차발전기의 소음과 수차발전기실의 음향특성을 분석하여 문제점을 파악하고, 시뮬레이션을 사용하여 방음대책을 제시해 보았다. 또한 가청화 실험에 사용할 어휘를 추출하기 위해 2단계의 청감실험을 하였으며, 이렇게 추출된 어휘를 사용하여 방음대책 수립 후의 음장을 체험할 수 있는 가청화 기법으로 개선 전·후의 소음 저감 만족도를 비교해 보았다.

3. 방음대책 수립

3.1 수차발전기

3.1.1 개요

수차발전기는 지하 3층부터 지하 1층까지 지름 11m의 원통형으로 설치되어 각층에 소음을 발생하고 있다. 수차발전기의 제원은 Table 1과 같고 모습 및 구조는 다음 Fig. 1과 같다.

다음 Fig. 2는 이러한 수차발전기에서 발생하는 소음의 주파수별 음향특성을 나타낸 것이다.

Fig. 2를 보면 수차발전기에서 발생하는 소음

Table 1 Specification of the model hydraulic turbine dynamo

Form	Sort	Shape	Capacity	Output
Semi-underground type	Francis	3-Phase vertical axis umbrella-type (Francis)	45000 kW ×2 unit	240~196 GWh

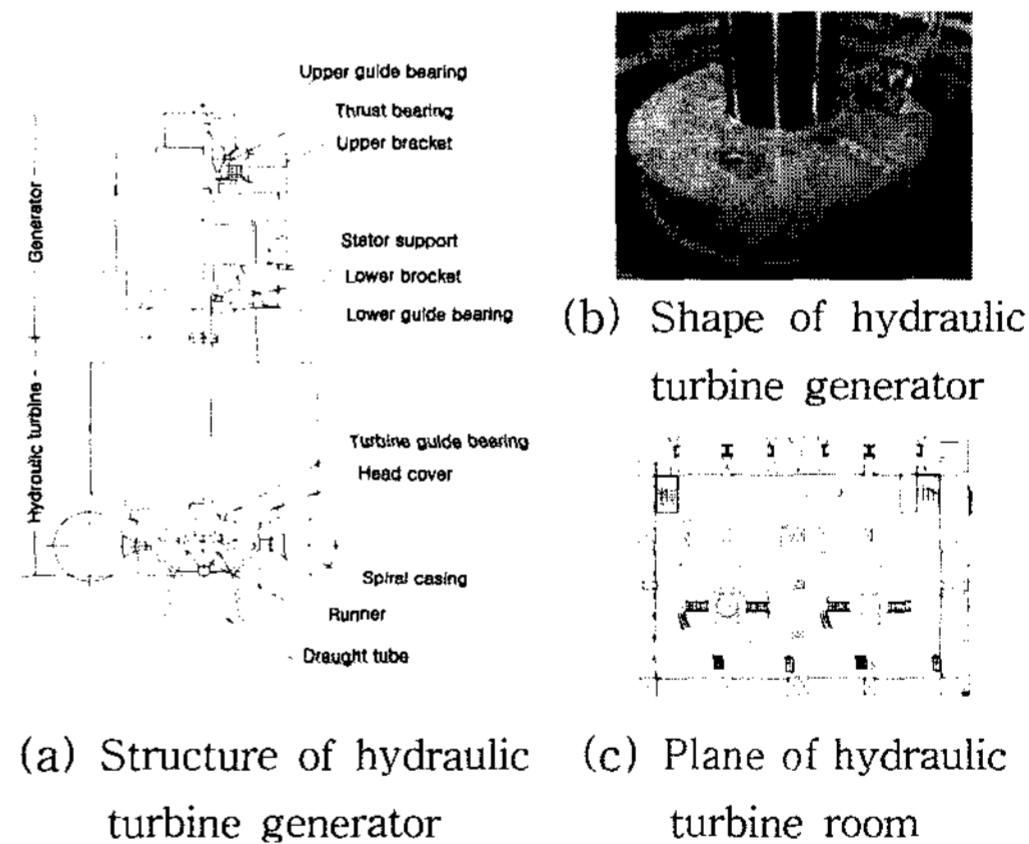


Fig. 1 1st, 2nd basement, shape and structure of hydraulic turbine generator.

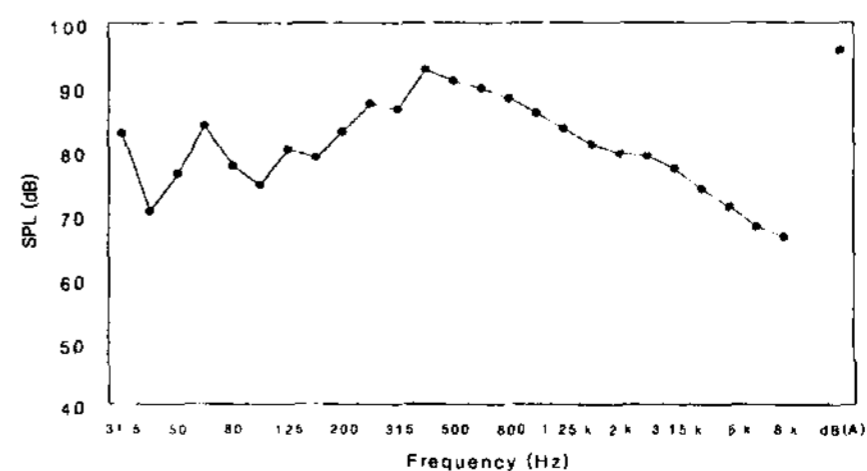


Fig. 2 Frequency characteristic of hydraulic turbine dynamo noise.

은 95.6 dB(A)의 높은 음압레벨로 나타났다. 주파수별 음압레벨의 경우 31.5 Hz~160 Hz의 저주파 대역에서는 불규칙한 패턴을 보이다가 400 Hz에서 92.7 dB의 Peak치를 나타낼 때까지 상승곡선을 그렸으며, Peak치 이후 주파수에서 서서히 감쇠하는 소음특성을 보였다. 또한 수차발전기에서 발생하는 소음은 95.6 dB(A)의 높은 음압레벨을 나타내고 있다. 이러한 소음이 수차발전기실로 전달될 경우 고소음으로 인한 의사소통 문제로 안전사고의 피해가 발생할 수 있을 것으로 사료된다.

3.1.2 수차발전기 입구에 철문설치를 통한 방음 대책

수차발전기에서 발생하는 고소음의 저감대책으로 수차실 입구에 철문을 설치하였다. 일반적인 설비기계실에서 철문의 투과손실은 약 19 dB(O.A)이지만 발전기실내부에서 철문에 의해 반사된 소음이 발전기위 상부에 있는 철판을 타고 수차발전기실로 직접 유입될 것을 고려해 약 10 dB(O.A)의 보정치를 주어 철문의 투과손실을 9 dB(O.A)로 적용하였다. 이때 보정치는 발전기실 내부를

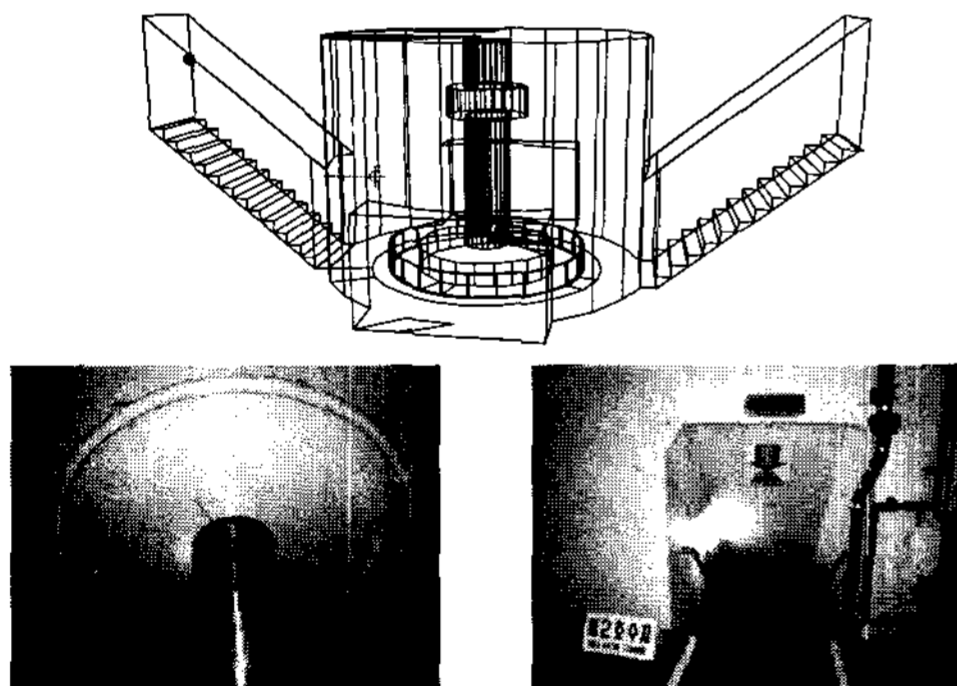


Fig. 3 Noise source entrance and noise source delivery.

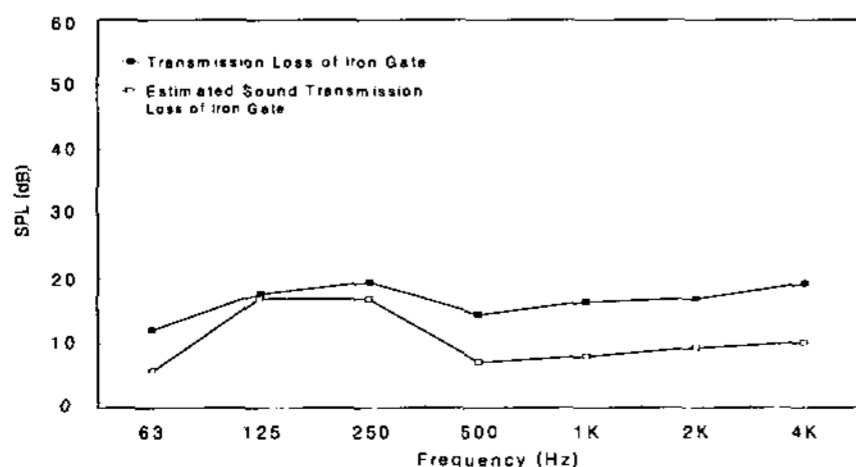


Fig. 4 Estimated sound transmission loss of iron gate.

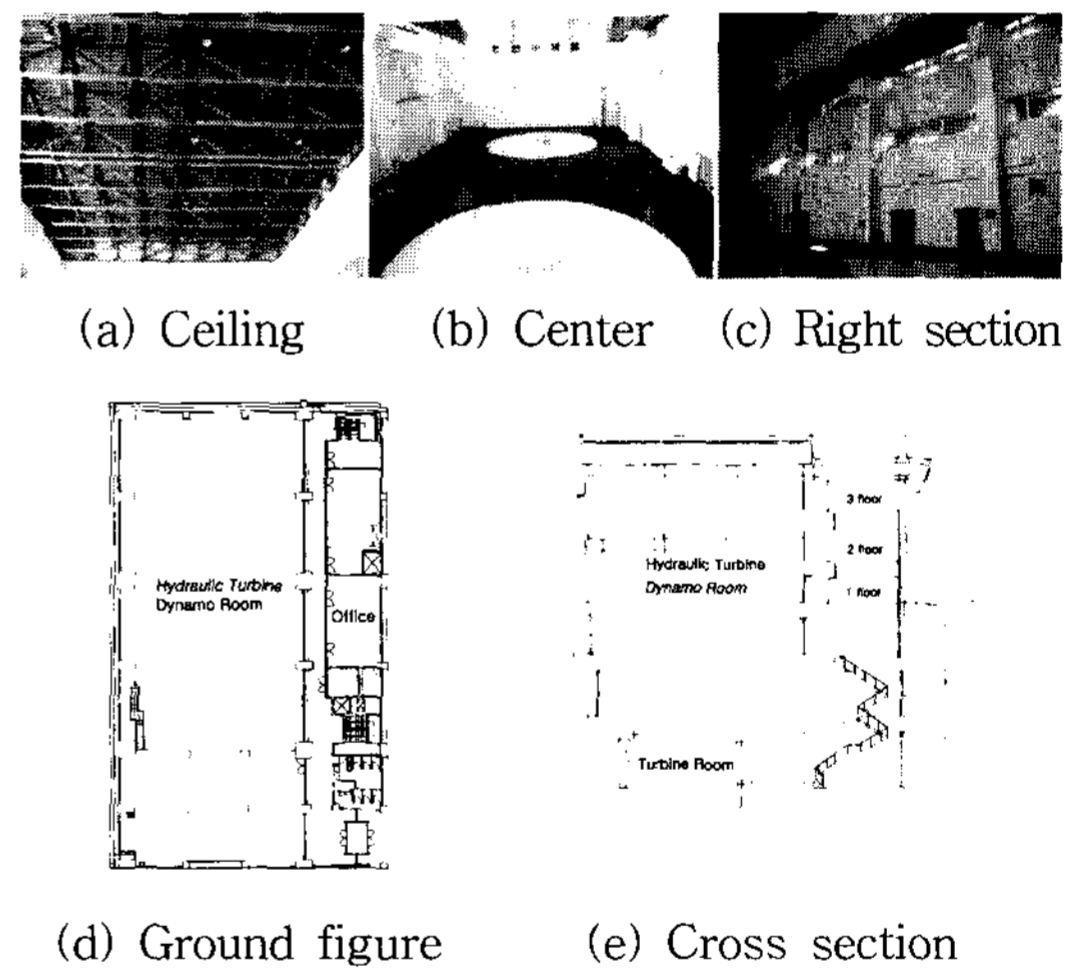
시뮬레이션하여 철문을 설치하였을 경우와 설치하지 않았을 경우의 차로 설정하였다.

철문으로 인해 저감되는 투과손실(TL, transmission loss)은 Fig. 4와 같다. Fig. 4를 보면 실제 적용한 투과손실 효과는 우회전달음 및 수차발전기실 내부에서 증폭되어 방사되는 음향 에너지를 고려하여 계산된 결과이다.

3.2 수차발전기실

3.2.1 개요

수차발전기실은 발전기 운행시 발생하는 소음의 시발점이 되는 수차실과 정온한 환경이 요구하는 사무실의 중간위치에 자리하고 있기 때문에, 내부음향상태가 매우 중요하다. 다음 Fig. 5



(d) Ground figure (e) Cross section

Fig. 5 Hydraulic turbine dynamo room.

Table 2 Specification of the model hydraulic turbine dynamo room

Division	Specification	Division	Specification
Length(m)	53.5	Width(m)	21.7
Ground area(m <sup>2</sup> )	1,160	Volume(m <sup>3</sup> )	22,800

Table 3 Architecture acoustic character of hydraulic turbine dynamo room

Architecture acoustic character(500Hz)				
	RT(sec)	SPL(dB)	D <sub>50</sub> (%)	RASTI(%)
Value	8.66	66.95	10.6	33.25

는 수차발전기실 내부의 모습이다. 수차발전기실은 4층 높이로서 체적이 22,800 m<sup>3</sup>으로 매우 크고, 내부 마감 재료는 모두 반사재질로 되어 있어, 내부에서 발생하는 소리를 증폭시키는 역할을 하고 있다. 다음 Table 2는 수차발전기실의 재원을 나타내고 있으며, Table 3은 선행연구된<sup>(2)</sup> 수차발전기실의 음향특성 값을 나타낸 것이다. Table 3의 건축음향특성을 보면 잔향시간(RT)은 평균이 8.66초, D<sub>50</sub>은 평균 10.65% RASTI값은 33.25%로서 아주 열악한 음향상태를 나타내고 있다. 이는 수차발전기실의 건립시 반사성이 강한 마감 재료의 사용으로 인해 잔향시간이 길게 나타났기 때문이며, 수차발전기의 고소음이 수차발전기실에 전달될 경우 소음이 증폭되어 의사소통의 문제는 더욱 심각해질 것으로 사료된다.

3.2.2 수차발전기실의 흡음판 설치 및 마감재료 변경

수차발전기실의 최적 설계목표는 Beranek이 제안한 체육시설의 잔향시간으로 Fig. 6과 같이 500 Hz 대역에서 최적잔향시간이 약 1.7초를 유지하

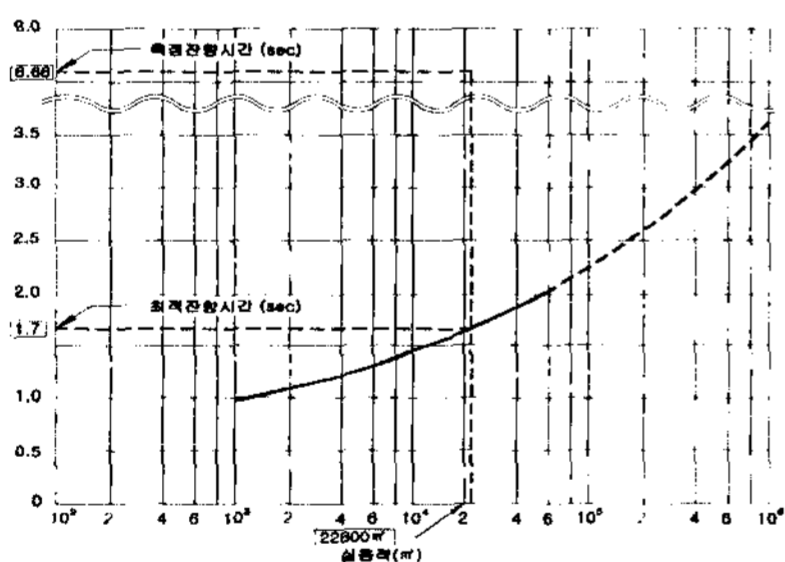
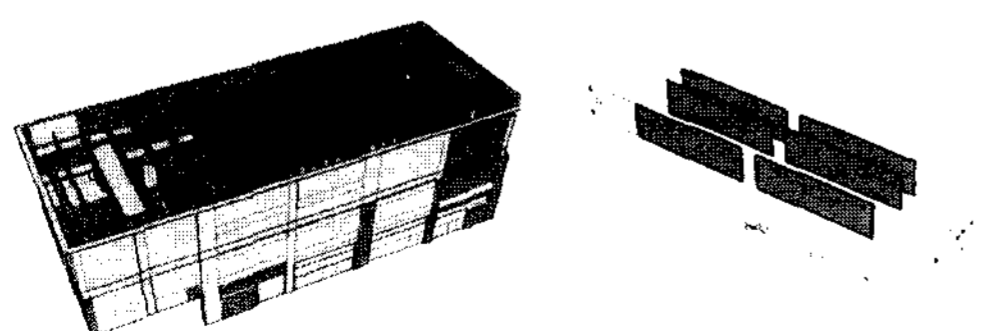


Fig. 6 Comparison of reverberation time of model hydraulic turbine dynamo room.



(a) Shape of sound-absorbing plate. (b) Figure of the established sound-absorbing plate.

Fig. 7 Sound-absorbing plate applied to the drawing.

Table 4 The finishing material for the researching subject hydraulic turbine dynamo before and after improvement

Division	Ceiling	Wall and post	Ground		
			1 F	1 F basement	
Before	Structure of truss	Above cement	Urethane	Finish of paint on tile	Iron plate
After	Rock wool 50T (sound absorbing plate)	Perforated fabric	Carpet	Carpet	Iron plate

Table 5 Comparison before and after improvement

Architecture acoustic character(500 Hz) comparison				
	RT(sec)	SPL(dB)	D <sub>50</sub> (%)	RASTI(%)
Before	8.66	66.95	10.6	33.25
After	1.71	58.23	80.25	69.13

는 것이 적정하리라 판단된다. 그러나 대상 수차발전기실의 경우 8.66초의 높은 잔향시간을 나타내어 대화를 통한 의사전달 등에 많은 어려움이 있어 안전사고가 발생할 수 있기 때문에 음향성능 개선이 반드시 필요하다. 대상 수차발전기실의 경우 큰 체적으로 인해, 마감 재료만을 바꾸어 적정잔향시간에 맞추기에는 무리가 있기 때문에 천장에 흡음판을 설치하였으며, 벽과 기둥, 1층 바닥의 재료를 변경함으로써 흡음 성능을 향상시켰다. 설계에 적용된 흡음판은 Fig. 7과 같고 변경된 마감 재료는 Table 4와 같다.

위의 내용을 바탕으로 선행연구 결과와 음향시뮬레이션을 통한 개선 전·후 실내음향 특성 비교결과는 다음 Table 5와 같다. Table 5를 보면 개선 전에 비해 개선 후의 잔향시간이 8.66초에서 1.71초로 크게 감소하였으며, 개선 후의 RASTI값이 33.25%에서 69.13%로 증가하여 음향성능이 크게 개선된 것을 알 수 있다.

4. 가청화 음향 시뮬레이션

가청화(可聽化)는 실의 설계단계에서 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 음향설계를 한 뒤 수음점에서 구한 Impulse response와 무향실에서 녹음한 Dry source를 합성연산하여 컴퓨터상에서 실이 완공되었을 때 음향상태를 직접 들어 볼 수 있는 시

시스템이다. 기존의 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 건축 음향설계는 건축가에게 설계단계에서는 많은 도움을 주었지만 실제 완공했을 경우 어떤 소리로 들릴 것인가에 대한 신뢰성은 거의 없었다. 그러나 가청화를 통해 설계단계에서 실이 완성된 후 음장을 직접 체험할 수 있으며, 실 형태의 결정, 마감재료의 선택, 음원의 지향성 등 각종 조건들의 변화에 따른 상황을 실제의 음으로 직접 들어봄으로써 실에서 요구하는 음향상태를 결정하는데 이용된다.

### 5. 가청화를 이용한 수차발전기 소음 전달의 저감효과 평가

#### 5.1 가청화 청감평가를 위한 평가 어휘 추출

가청화 청감평가에 앞서 수차발전기실의 소음 저감 정도를 주관적으로 평가할 수 있는 적절한 평가어휘 선정을 위해 기존에 연구되어진 소음에 대한 평가어휘<sup>(3)</sup> 168개의 어휘를 대상으로 2단계의 설문조사를 실시하여 수차발전기실의 소음을 표현하는데 적절한 어휘 8개를 추출하였다. 평가

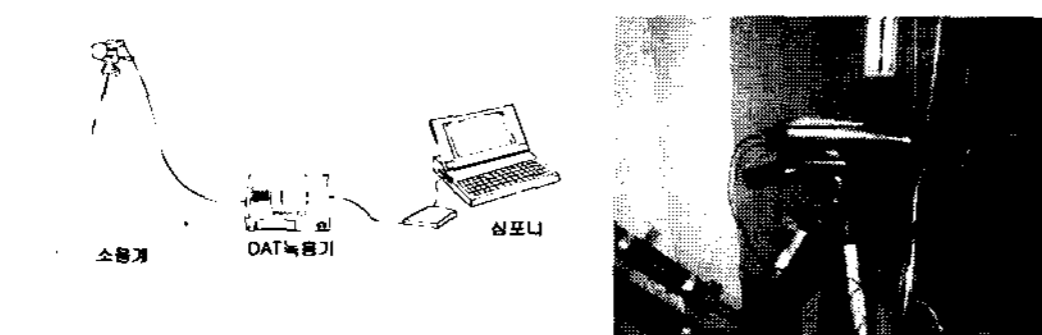


Fig. 8 Composition of measuring machinery and tool.

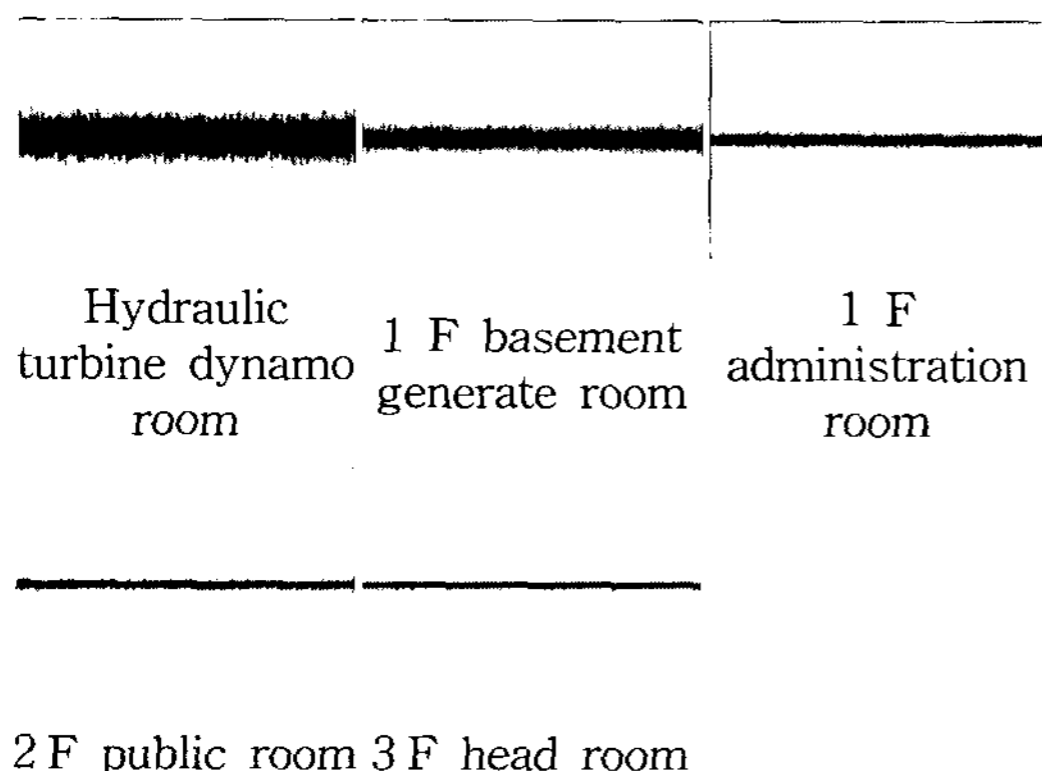


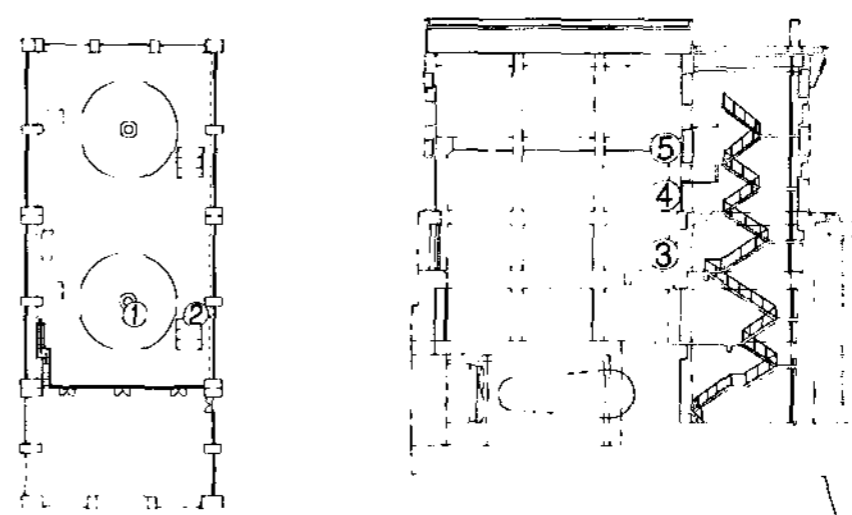
Fig. 9 Form of sound source.

어휘 추출을 위한 음원은 Fig. 8과 같이 지면으로부터 1.2m의 높이의 소음계를 통해 들어오는 신호를 DAT(digital audio tape recorder)로 현장에서 30초간 녹음한 뒤 Cool Edit 2.1 Pro 프로그램을 이용하여 편집, 제작하였고 측정모습 및 음원의 형태는 Fig. 9, 음원의 위치는 Fig. 10과 같다.

1차 청감실험에서는 168개의 어휘를 대상으로 설문조사를 실시하여 상위 30개의 어휘를 추출하였으며, 2차 청감실험에서는 1차 청감실험 결과 추출된 30개의 어휘를 다시 평정척도법의 5단계 척도로 설비소음에 대한 음향 심리분석을 위한 청감실험을 실시하여 적정어휘를 추출하였다.

Fig. 11은 1차 청감실험 득점 상위 30위의 표현어휘이며, Table 6은 30위의 표현어휘를 다시 평정척도법(method of rating scale)의 5단계 단극척도로 ‘매우 그렇다(5)’-‘그렇다(4)’-‘보통이다(3)’-‘그렇지 않다(2)’-‘전혀 그렇지 않다(1)’로 구분하여 얻은 평균득점표이다.

2차 청감실험 결과 “듣기 싫다”, “신경쓰인다”, “방해된다”, “거슬린다”, “시끄럽다”, “싫다”, “불



(a) Ground figure (b) Cross section  
Fig. 10 Sound source point.

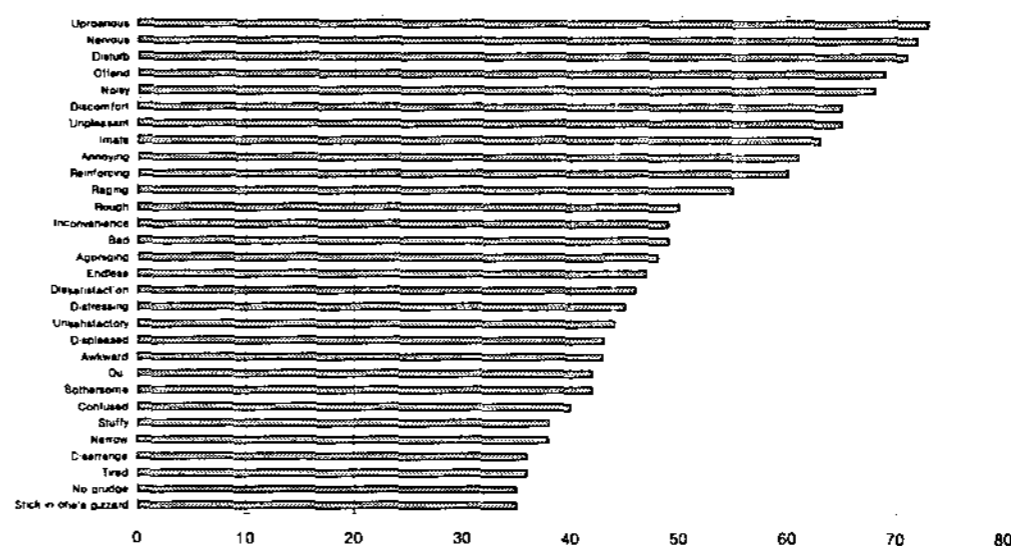


Fig. 11 Expressing vocabulary in top 30 ranks scored at the 1st psycho-acoustics experiment.

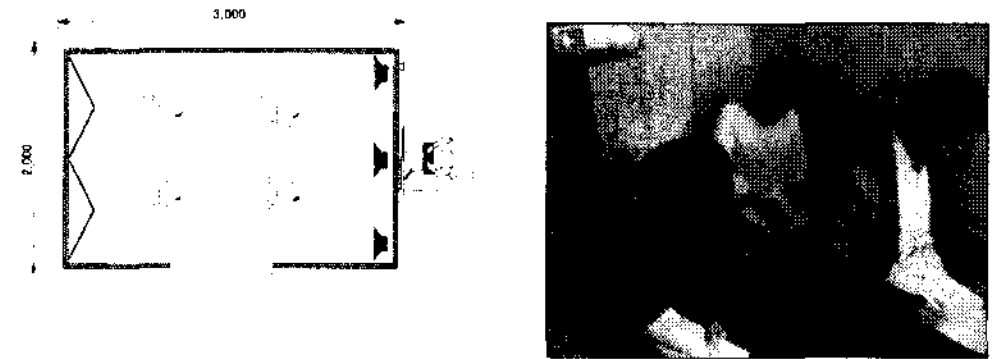
Table 6 Average score of the vocabulary ranked in the 30 superior positions

Vocabulary	Average	Vocabulary	Average	Vocabulary	Average	Vocabulary	Average
Uproarious	4.23	Annoying	3.67	Dissatisfaction	3.34	Narrow	2.50
Nervous	4.20	Reinforcing	3.65	Distressing	3.29	Stuffy	2.39
Disturb	4.19	Raging	3.58	Unsatisfactory	3.28	Tired	2.29
Offend	4.06	Rough	3.53	Awkward	3.13	Disarrange	2.27
Noisy	3.94	Bad	3.51	Displeased	3.04	Stick in one's gizzard	2.13
Unpleasant	3.91	Inconvenience	3.47	Bothersome	2.68	No grudge	1.62
Discomfort	3.88	Agonizing	3.43	Dull	2.58		
Irritate	3.82	Endless	3.41	Confused	2.50		

쾌하다”, “짜증스럽다”의 어휘가 높은 평균득점을 얻었다. 따라서 이러한 어휘들을 이용하면 수차 발전기에서 발생하는 소음의 주관적 반응을 정확히 평가할 수 있을 것으로 사료된다.

5.2 가청화 청감평가방법 및 실험

피험자는 20명으로 전부 남성들이며 정상청력의 20대가 참여하였으며 실험에 대한 이해를 돕기 위해 수차 발전기실의 문제점과 음원 및 어휘에 대한 설명을 충분히 해준 뒤 실험을 실시하였다. 청감실험은 Fig. 12와 같이 원광대학교 청감 실험실(psycho-acoustics chamber)에서 실시하였다. 500 Hz에서 잔향시간(RT)은 0.09초, 음성명료도(D50)는 99.9%, 음성전달지수(RASTI)는 93%로서 무향실(anechoic chamber)과 같은 조건을 갖춘 실험실이며, 음원재현 방법은 노트북을 이용하여 현장 녹음사와 같이 기준음을 틀어놓고 앰프로 94 dB을 맞춘 후 녹음한 음원을 스피커를 통하여 들려주었다.



(a) The auditory feeling laboratory (b) A scene of the auditory feeling laboratory

Fig. 12 Photograph for psycho-acoustics.

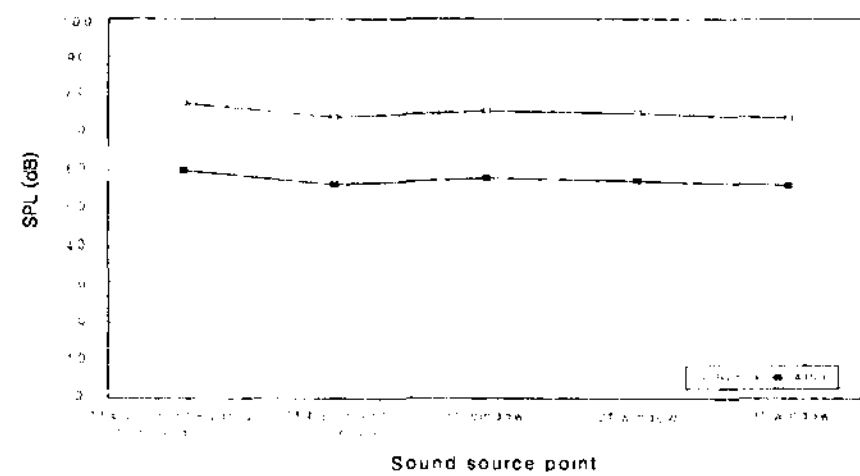


Fig. 14 SPL comparison of sound resource at before and after of Improvement.

	Source sound 1. 1F basement hydraulic turbine dynamo	Source sound 2. 1F basement staircase	Source sound 3. 1F window	Source sound 4. 2F window	Source sound 5. 3F window
Before sound source					
After sound source					

Fig. 13 Comparison of auditory-evoked sound source forms.

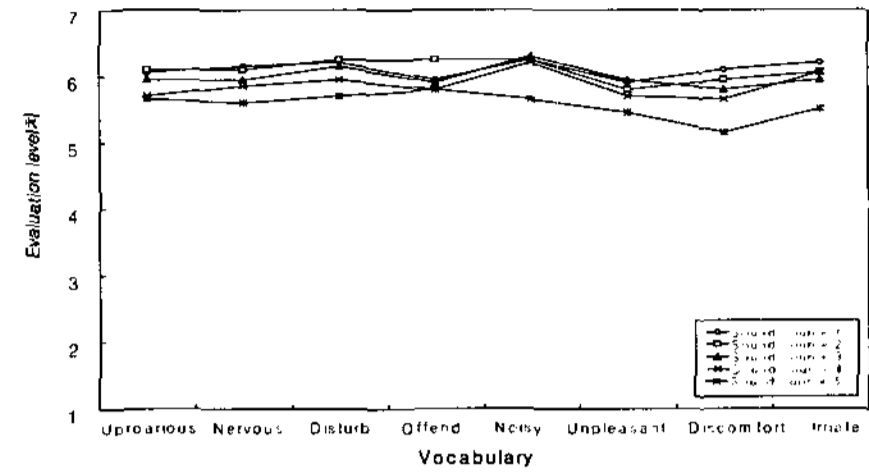


By item	Evaluation						
	1	2	3	4	5	6	7
Uproarious	-	+	+	+	+	+	-
Nervous	-	+	+	+	+	+	-
Disturb	-	+	+	+	+	+	-
Offend	-	+	+	+	+	+	-
Noisy	-	+	+	+	+	+	-
Unpleasant	-	+	+	+	+	+	-
Discomfort	-	+	+	+	+	+	-
Irritate	-	+	+	+	+	+	-

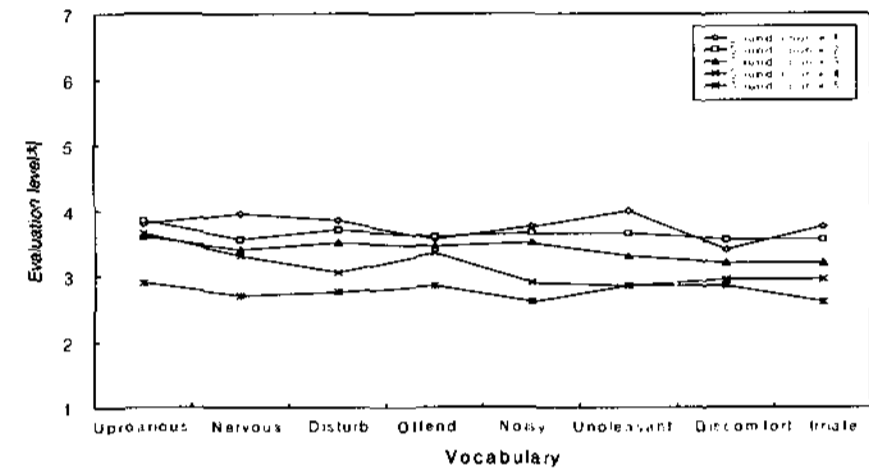
Fig. 15 Evaluation sheet for assessment on subjective.

5.3 가청화 청감평가를 위한 음원의 구성

본 연구에 사용된 가청화 음원은 현장과 똑같이 재현하기 위하여 개선전의 음원은 현장에서 녹음한 음원을 사용하였다. 이 음원을 음향시뮬레이션 프로그램(Odeon 4.21)에서 가청화한 후 wav 파일로 저장된 결과를 Cool Edit Pro 2.1로



(a) Average reaction before improvement



(b) Average reaction after improvement

Fig. 16 Average reaction with each vocabulary before and after improvement.

분석한 음원형태는 Fig. 13와 같고, 개선 전·후의 음압레벨은 Fig. 14와 같다. Fig. 13의 음원형태와 Fig. 14의 음압레벨 차이를 보면 소음저감

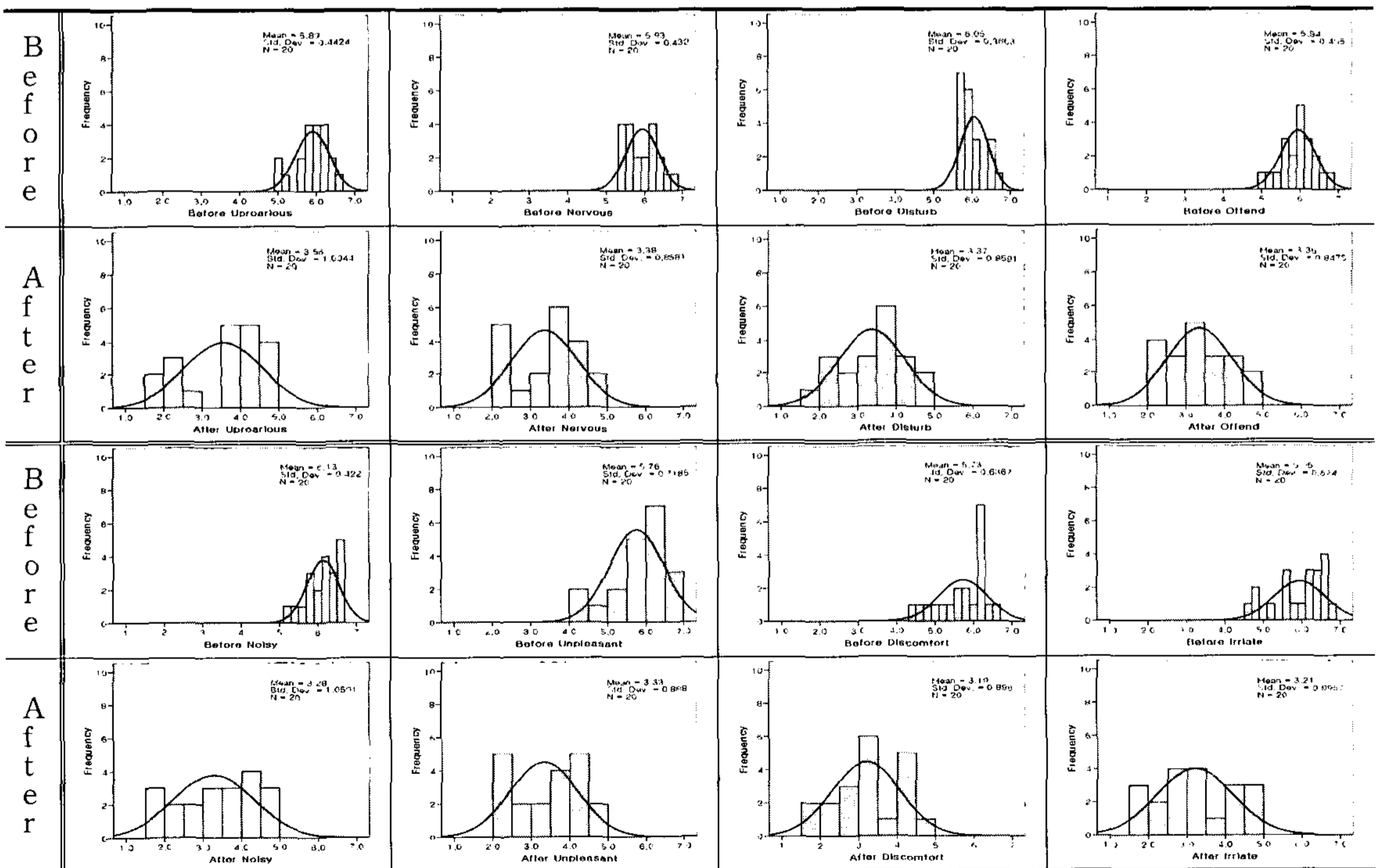


Fig. 17 Frequency analysis before and after improvement(normal distribution curve).

방안을 적용했을때 개선 전보다 소음이 훨씬 저감된 것을 알 수 있다. Fig. 15는 청감실험을 통해 추출된 8개 어휘를 통해 주관적 반응을 평가하기 위한 평가시트이다.

#### 5.4 각 평가어휘에 따른 평균적 반응 분석

수차 발전기실의 개선 전·후의 평가를 각 항목별 응답결과로 정리한 결과는 다음 Fig. 16과 같다.

개선 전에는 모든 평가 어휘에 대하여 평균반응치가 5이상의 높은 반응치를 보였으며, 그 중 “시끄럽다”는 5.65~6.3, “짜증스럽다”는 5.5~6.2로 평가되어 다른 어휘에 비해 다소 높게 평가되었다.

그러나 여러 요소를 고려한 개선 후에는 모든 평가어휘에서 2.6~4의 평가 반응치가 나타나 확실하게 소음저감 효과가 있는 것으로 나타났다. 또한 음원 5는 3층에 해당하는 음원으로서 다른 음원에 비해 개선전·후의 평가반응치가 낮음을 알 수 있다. 이것은 거리감쇠로 인하여 생기는 소음저감효과로 사료된다.

#### 5.5 대상 수차발전기 소음 전달의 저감효과 비교분석

가청화를 실시한 수차 발전기실의 각 평가 어휘별 5개 음원 전체에 대한 개선 전·후 응답결과의 정규분포 곡선은 Fig. 17과 같다.

정규분포곡선에서 모든 평가항목에서 개선 전·후의 결과가 뚜렷하게 비교가 되며, 각 어휘가 평가된 평균값으로 비교해 보았을 때 “시끄럽다”의 어휘가 가장 큰 폭으로, “짜증스럽다”>“방해된다”>“불쾌하다”>“거슬린다”>“신경쓰인다”>“싫다”>“듣기싫다”의 순으로 소음 저감정도를 느끼는 것을 알 수 있었다. 따라서 음향설계를 통하여 잔향시간을 줄임으로써 음압레벨이 낮아져 분명하게 수차 발전소음이 저감되었음을 청감실험을 통하여 실내음향 및 소음저감 효과에 대하여 긍정적인 평가를 얻었음을 알 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구는 인접한 사무실에서 근로자들에게 미

치는 영향을 개선해 보고자 수차발전기와 수차발전기실의 방음대책을 수립해 보았으며, 이러한 방음대책의 효과를 가청화기법으로 평가해 보았다.

(1) 수차발전기에서 발생하는 소음은 95.6 dB(A)의 높은 음압레벨을 나타내고 있었으며, 이러한 문제를 개선하기 위해 음향시뮬레이션을 이용하여 방음대책을 수립하여 보았다. 첫 번째 방법으로 수차발전기 입구에 철문을 설치하여 9 dB의 음압레벨을 저감할 수 있었으며, 두 번째 방법으로는 수차발전기실 마감재료의 변경과 흡음판 설치로 음향상태를 최적화하였다. 그 결과 RT값이 8.66초에서 1.71초, SPL이 66.95 dB(A)에서 58.23 dB(A),  $D_{50}$ 는 10.6%에서 80.25%, RASTI값이 33.25%에서 69.13%로 개선되었음을 알 수 있었다.

(2) 수차발전기에서 발생하는 고소음에 대한 주관적 반응을 평가하기 위해 청감실험을 실시하였으며, “듣기 싫다”, “신경쓰인다”, “방해된다”, “거슬린다”, “시끄럽다”, “싫다”, “불쾌하다”, “짜증스럽다”가 적정 평가어휘로 추출되었다. 이러한 적정 평가어휘 8개를 이용하여 개선 전·후의 가청화 청감평가를 실시하였으며, 그 결과 전체 음원에 대한 각 어휘에 대한 평가반응치는 “시끄럽다”>“짜증스럽다”>“방해된다”>“불쾌하다”>“거슬린다”>“신경쓰인다”>“싫다”>“듣기싫다”순으로 소음 저감 정도를 느낌을 알 수 있었다. 또한 개선 전·후의 어휘에 대한 평균반응치는 “시끄럽다” 어휘의 경우 5.65~6.3에서 개선 후에 3.75~2.6으로 가장 큰 폭의 저감정도를 나타내었으며, 이외의 다른 어휘에 대해서도 개선 후의 평가반응치가 개선전보다 낮게 평가되어 실내음향 및 소음저감 효과에 대하여 긍정적인 평가를 얻었음을 알 수 있다.

위와 같은 결과를 반영하여 설계한다면 물리적 파라메타 및 수차 발전기실 및 인접한 사무실내의 작업자들의 느낌까지 반영할 수 있어 더욱 훌륭한 공간이 될 것이며 이러한 자료는 수차 발전기실 및 이와 유사한 작업장의 건축 음향적 요소 및 소음저감 효과를 향상시킬 수 있는 유용한 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

## 후 기

이 논문은 2008년도 원광대학교 교비지원에 의해 수행되었습니다.



## 참고문헌

1. Kim, J. S., 2007, Architectural acoustic design (3rd edition), Sejin Co.
2. Kook, J. H., Kim, D. G. and Kim, J. S., 2007, A study on the architectural acoustics characteristics of hydraulic turbine dynamo room in dam, Architectural Institute of Korea, Autumn Conference For Science Presentation pp. 937-940.
3. Yoon, J. H., Ju, D. H. and Kim, J. S., 2007, A study on valuation of acoustic performance about dome-typed gymnastics training floor utilizing auralization, Proceedings of The KSNVE 2007 Autumn Annual Conference, pp. 708-719.
4. Kook, J. H., Jung, C. H., Yoon, J. H. and Kim, J. S., Experimental study on wall sound transmission loss at construction equipment machinery room, Proceedings of The KSNVE 2007 Autumn Annual Conference pp. 22-22.
5. Jung, K. Y., 2002, Study on the psychological evaluation of resident environmental noise using korean language vocabulary, Thesis for a Doctorate at Chonnam University, Gwangju, Korea.