

# 低頻噪音與控制

中鼎工程公司 林啟修助理總工程師  
台灣產業服務基金會 宋明裕工程師

## 一、前言

根據環保署 89 年至 93 年噪音陳情案件處理結果統計資料，在 13 萬多件的陳情案件中，屬於符合標準、無法監測或未發現噪音源者占 94%，而限期改善件數僅佔 6%，污染告發比例偏低；其中有部分陳情案件雖經多次稽查結果仍符管制標準，卻仍遭民眾不斷陳情；探究其造成擾人之原因，極可能來自低頻音之特性所引起。

在人為活動時產生的低頻音，通常是由機械運轉時所引起，主要來源有壓縮機、抽/送風機、引擎、抽水機、振動篩、破碎機、輸送帶、燃燒機械（如鍋爐）、空調系統、冷卻水塔等等。近期，環保署為確實改善各類場所及設施噪音源，有效管制低頻噪音，以維護民眾生活環境之安寧。近年來環保署為解決低頻噪音（20Hz 至 200Hz）擾人問題，已於 94 年 7 月 1 日起對於娛樂與營業場所低頻噪音實施管制；並參考德國、丹麥、日本等國之低頻噪音管制建議（參考）值，及國內 50 處工廠（場）本土低頻噪音檢測結果，增加 20Hz 至 200Hz 頻率範圍之工廠(場)噪音管制標準，將於 97 年 1 月 1 日起進一步將工廠（場）低頻噪音納入管制，期使相關噪音源工廠負起改善低頻噪音之責任，工廠低頻噪音管制標準如表所示。

## 工廠噪音管制標準

音量 管制區	時段	20 Hz 至 200 Hz，自中華民國九十七年一月一日施行			<u>20Hz 至 20kHz</u>		
		日間	晚間	夜間	日間	晚間	夜間
第一類		42	42	39	50	45	40
第二類		42	42	39	60	55	50
第三類		47	47	44	70	60	55
第四類		47	47	44	80	70	65

根據研究，低頻噪音不僅會對睡眠及心理造成負面影響，嚴重者甚至導致精神衰弱、憂鬱症及婦女不孕等。由於低頻噪音不如一般寬頻噪音在噪音控制上較不易有效處理也最令人煩惱，因此本文將針對低頻噪音的特性及其控制做概要性說明並以實際案例介紹，期望能提供業者及相關產業界對於低頻噪音的基本認知及正確防治觀念。

## 二、何謂低頻噪音及其影響

通常頻率低於 20 Hz 聲音稱之為次音波或超低頻，而人耳朵可以聽到的音頻範圍在 20 Hz~20K Hz，一般噪音多屬於此一範圍內。低頻噪音則跨越超低頻及可聽覺頻率，通常考慮範圍在 10~200 Hz，但並不是絕對的。低頻噪音定義說法不一，環保署目前針對娛樂及營業場所公告之低頻噪音管制標準為頻率在 20~200 Hz 範圍內之噪音；有些文獻則指稱為低於 100~150 Hz 的聲音，而其中頻率在 10~100 Hz 是最被關切的範圍，雖然一般人耳朵感覺不出來，但卻嚴重危害人體健康。因此在討論低頻噪音時不能將超低頻排除，而必須就 10~200 Hz 作整體考量。

就年齡而言年長者對低頻的感受較年輕者明顯，主要原因為人耳聽力會隨年齡增加而衰退，但並不是全頻帶完全一樣，通常在中、高頻部份衰退程度會較低頻來得大，因此表現在不同年齡對低頻的感受也大相逕庭。另外，每個人在聽覺識閾上的反應也不一樣，因此並不是所有人對低頻都會有耳鳴現象，有時也可能是個人對聽覺過度敏感所致。

### 三、低頻噪音產生方式及行為

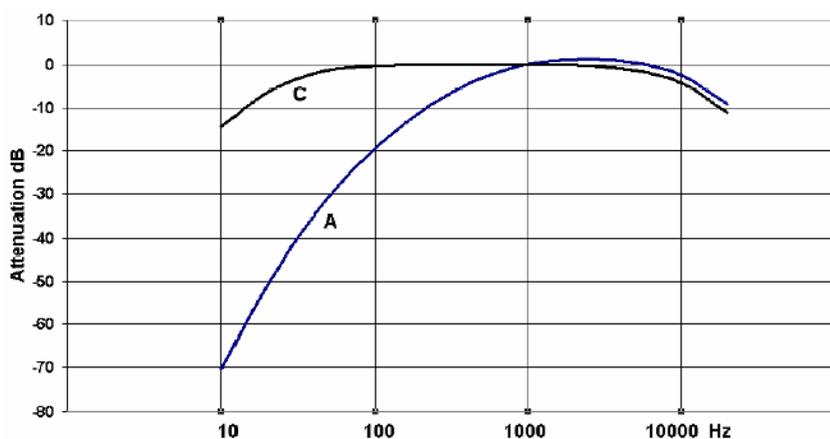
低頻噪音問題可以發生在 10~200 Hz，但通常指頻率在 40~60 Hz 範圍，最普遍的噪音源來自工業界製造之轉動及往復式設備居多，經常可見者包括：泵浦、風機、空調系統、發電機、變電器及鍋爐等，但也可能存在於居家生活中一般家用電器如：冰箱、洗衣機等，其他像道路行駛之車輛、捷運系統軌道等。

低頻噪音傳遞特性上不如中、高頻噪音相對於大氣及地表吸音上有較大衰減量，這也說明了當噪音遠距離傳遞時，為何低頻部份會聽得更清楚之故。有時低頻噪音似乎更像是振動，主要是因為它可以造成結構音，傳統建築物牆面大多無法有效阻隔低頻噪音，當室內門窗關閉時，雖然建築物本身對中、高頻率聲音有較佳的隔絕性能，但低頻噪音仍會從室外穿透至室內，以及由相鄰房間、樓板穿透，因此更加強低頻噪音對室內的影響程度。另外，由於低頻噪音波長大致與一般房間大小相近，因此也可能會使得室內在某些節點及反節點處形成駐波而產生共鳴現象，造成室內某些點位置的低頻噪音升高。

### 四、低頻噪音評價方法

大多數人對於低頻的察覺並不是非常敏感，尤其是低於 20 Hz 的超低頻，此類噪音在量測與評估上是最困難的。根據國外研究調查顯示以人耳聽覺相對於 1000 Hz 的感受為基準，其在 100 Hz 為減少 25 dB、50 Hz 為減少 40 dB、20 Hz 則減少 70 dB。換言之，除非音量位準值超過 70 dB，

否則 20 Hz 範圍的聲音被聽到的可能性是很低的。噪音計 A 權通常是用來評價環境噪音，在 1000 Hz 以下會隨頻率愈低而增加修正值，至 10 Hz 時 A 權修正值達 70 dB。世界衛生組織建議以 C 權來評價身體影響較為理想，C 權在 50~1000 Hz 僅衰減 1 dB 幾乎呈現平坦響應，而在 31.5 Hz 衰減 3 dB、在 10 Hz 衰減 14 dB。有關 A 權與 C 權相對於八音階頻譜之修正值如下圖。

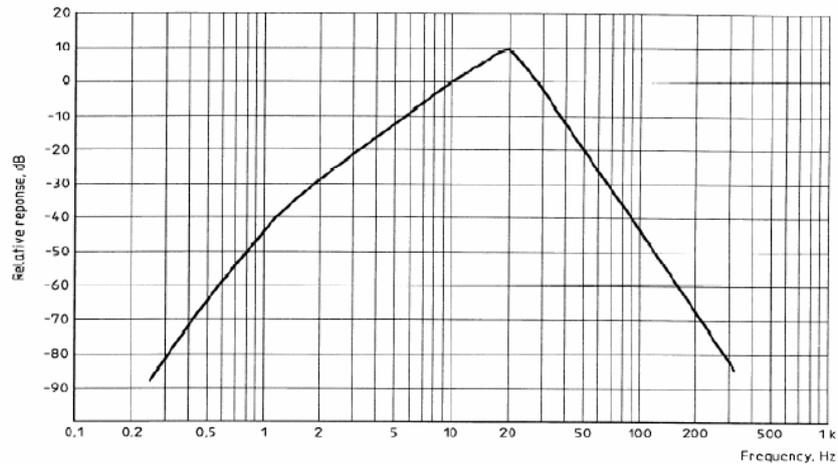


**Sound level meter weighting curves – A and C.**

當量測 A 權與 C 權值相差在 20 dB 時可以初步判定可能有低頻噪音問題存在，而在評估是否有單頻音存在則可以比較 1/3 八音階頻譜，如果相鄰頻率之位準值差距符合下表情況時，則可能有單頻音存在；另可以再檢查其他和諧頻率，通常其一階及其更高階和諧頻率也都會出現類似特徵。

Hz	相鄰頻率位準差值
$\geq 500$ Hz	5 dB
160 - 400 Hz	8 dB
$\leq 125$ Hz	15 dB

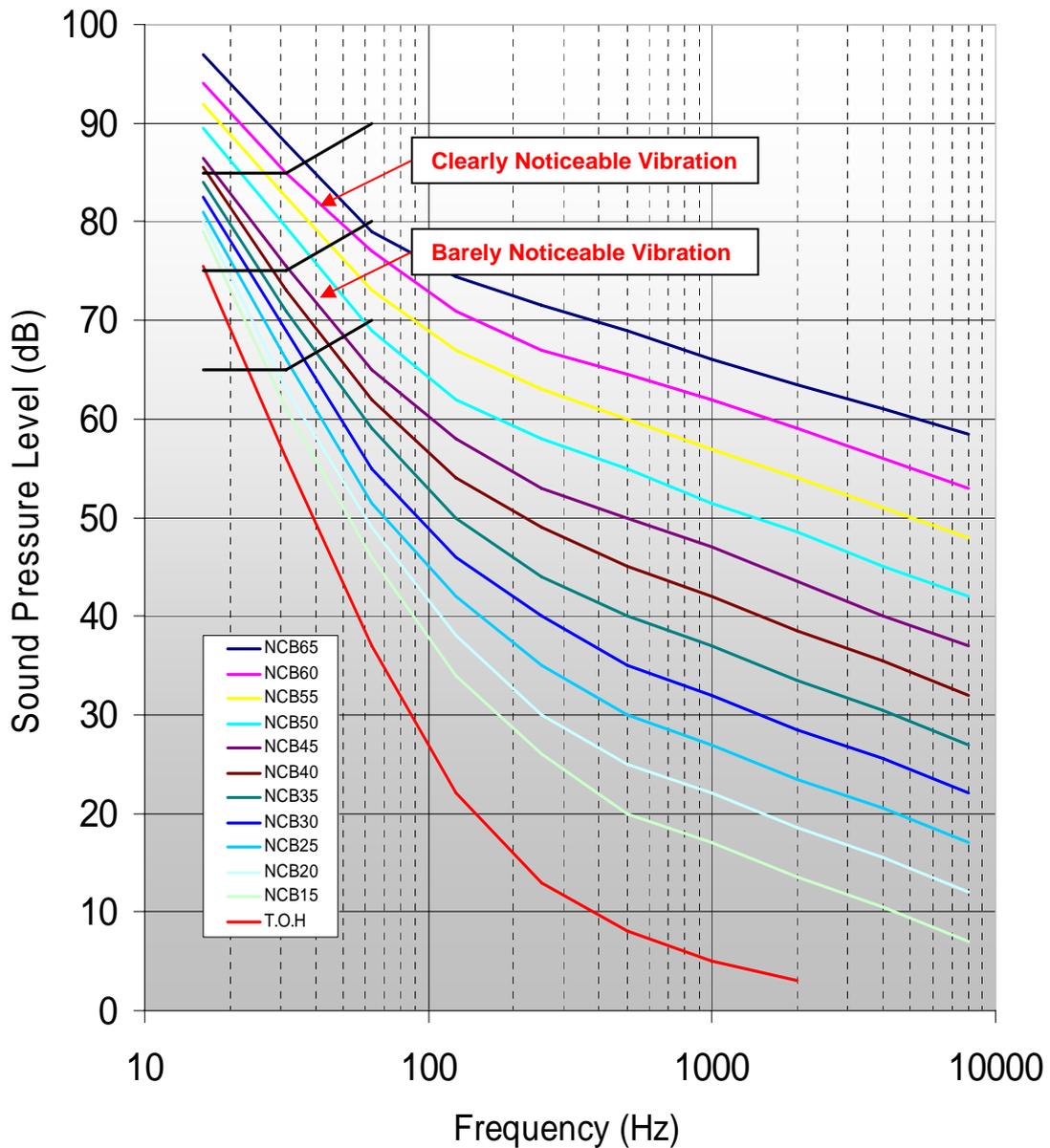
至於低於 20 Hz 之次音波評價則可參考 ISO 7196 所使用 G 加權來進行量測。G 加權在 20 Hz 以上大幅衰退，而在 2~20 Hz 則是以每八音階頻率減少 12 dB 比例修正。人耳對於次音波的察覺識閾值約在 95~100 dBG，因此在 85~90 dBG 的次音波通常對人察覺並不是很重要。



### **G-weighting for infrasound.**

Leo L. Beranek 修正 NC 曲線為 NCB (Balanced Noise Criterion Curves) 曲線，並將頻率範圍向下延伸至 16~63 Hz，可做為合理評估低頻隆隆 (rumble) 噪音的標準。

## Balanced Noise Criterion Curves NCB Curves

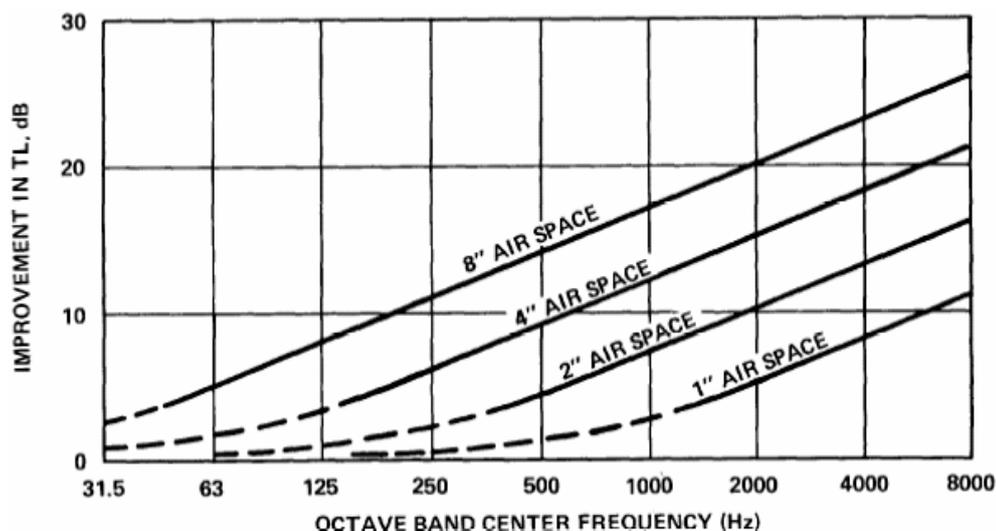


### 五、低頻噪音控制原理

對於經由空氣傳播的低頻噪音除非直接針對噪音源加裝消音設施來減少低頻噪音外，否則可能就必須從聲音隔絕上著手。就聲響理論中有關質量密度定律，密度愈大愈重的材料其聲音穿透損失值愈大，因此使用厚重的單層牆面或是複合式多重牆壁，來達到有效阻隔低頻噪音是必要的。對於先進的建築設計在結構及材料選取上，應該以加厚樓層板及使用雙層隔

戶牆板和較厚的膠合玻璃(18 mm)等來有效阻隔低頻噪音。不過這樣的作法有時候並不是非常實際且將增加成本。因為按照質量密度定律，如果為了達到同樣的噪音減弱程度，要隔離 200 Hz 的低頻噪音，隔音材料的質量要比隔離 1000 Hz 的噪音多 5 倍；而雙層隔戶牆板之聲音穿透損失值會隨著空氣層間距增加而提高(如下圖所示)，以 200 Hz 而言，8"空氣層可以增加 10 dB 聲音穿透損失值，不過牆面會變得很厚而減少了室內空間。

再者從吸音控制觀點來看，吸音材料厚度至少要達到主要波長的 1/3~1/4，例如使用楔型吸音材，才能將低頻部份的吸音率提高至 0.8 以上，此種作法多半是用於無響室或是半無響室等特殊用途場所，一般用途場所及住戶則不太可能應用的。



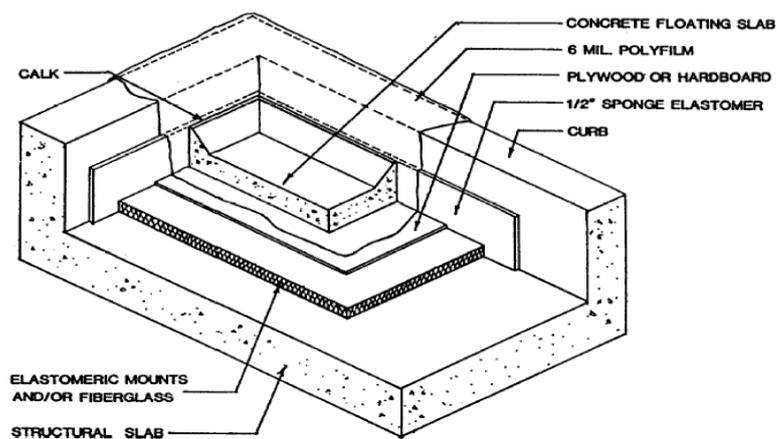
消音器被廣泛應用於空氣動力及相關流體輸送過程中之減音，然並非所有型式消音器都適用於低頻或是單頻音情況下，當噪音呈現低中頻率且含有單頻音特性時，可以考慮以共振式消音器設計方式，並限制其氣流通道寬度不宜超過 250 mm，而共振器各部份尺寸(長寬高)應小於共振頻率波長的 1/3。而針對噪音具有明顯中、低頻率脈衝特性時，應選用膨脹室(或稱擴張室)式消音器並依照下列設計準則：

- (1) 利用增加擴張比(即室與管的斷面積比)來提高膨脹室式消音器減音量。
- (2) 利用改變膨脹室長度來調整消音頻率特性，當使用多個膨脹室串

聯時各室長度應避免相同。

- (3) 使用多個膨脹室串聯方式來提高消音器減音量。
- (4) 應用室內插入內接管設計方式以消除周期性通過頻率的聲波。內接管管徑過大時可採用多管式設計方式。

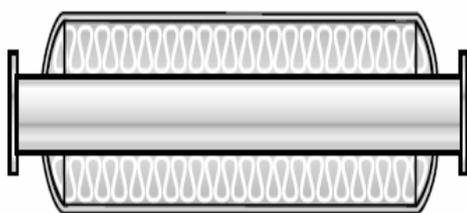
對於設備振動引起建築物低頻結構音可從振源及傳播路徑上控制，通常最直接有效的方法是從振源著手，選用平衡良好的旋轉式設備取代往復式設備可以有較低的振動；而如果需要達到更大的振動減量時，可以依照振動隔離效率來選擇適當自然頻率的隔振器或材料。一般最低隔振效率為 70~80 %、標準為 80~90 %、而在極為嚴苛環境下可達 95~99 %。對於做為特殊用途之房室或是機房直接設置在辦公室上層時，則可以考慮使用浮動地板(如下圖所示)來提高空氣音及結構音之隔離效果，以符合 NCB 曲線限值。設計浮動地板時要特別注意避免有噪音及振動側傳(flanking)情況發生，否則將減少 50%的隔離效果。基本上浮動混凝土板是以壓縮之玻璃纖維棉或佈置之金屬彈簧、合成橡膠墊等獨立支撐於結構樓板上(高度至少 2")，上述材料之密度及載荷必須要遵照製造商的建議，如使用金屬彈簧其靜荷重撓度應不得小於 1/4"。對於置於浮動地板上之荷重應在設計限值以下，並避免過度集中在某一區域，造成額外撓度而導致浮動混凝土板龜裂。



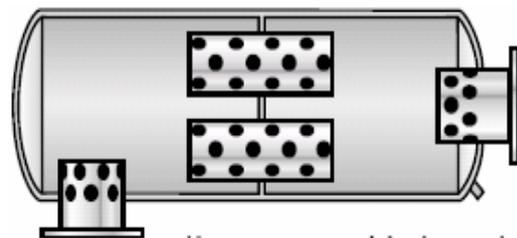
## 六、實例介紹

某垃圾資源回收廠地下室廢水處理場曝氣池中 4 部沉水式鼓風機，雖然設備本身在曝氣池內，但其 4”進口端因直接通大氣，故仍然會經由管內傳出噪音特別是會產生非常強烈的中、低頻噪音(125 Hz~500 Hz)，其 250 Hz 處噪音高達 104~111 dB(A)，由於位於室內且靠近壁面導致整個地下室回響音場相當嚴重，即使在距鼓風機遠處之工作區域，操作人員亦無法輕易彼此交談。由於主要影響頻率集中在中、低頻部份，如果考慮以增加壁面吸音面積，來提昇室內吸音力來降低回響音場，可能需要相當大的面積，且一般吸音材料如：玻璃纖維棉或岩棉在低頻部份(125 Hz)的吸音率並不高(0.05~0.3)，若要提高低頻部份吸音率除非是增加吸音材厚度及密度，或是在吸音材與壁面間增加空氣層(至少 150 mm)。經評估後認為以吸音處理方式並不實際且效果有限不符合成本效益。

最直接而實用作法為在鼓風機進氣口端加裝消音器。通常設備廠商多數所提供的消音器屬於吸收式，是一種簡易直通式，這類型消音器對於小型高轉速鼓風機在高頻部份或許可以提供較佳的減音性能。使用反應式消音器可以彌補前述吸收式消音器在低頻部份噪音插入損失之不足，常見基本型式為膨脹室及側邊共振器。本案例由於受限於空間關係，因此採用兩個膨脹室串聯方式，擴張比為 36、膨脹室總長度為 865 mm、室內插入 2 根 3”內接管長度 285mm，有效開口面積 137.6 cm<sup>2</sup>，為了提高中、高頻部份減音量，並減少噪音由消音器外殼透射，膨脹室內襯密度 48 kg/m<sup>3</sup>、50 mm厚玻璃纖維棉。

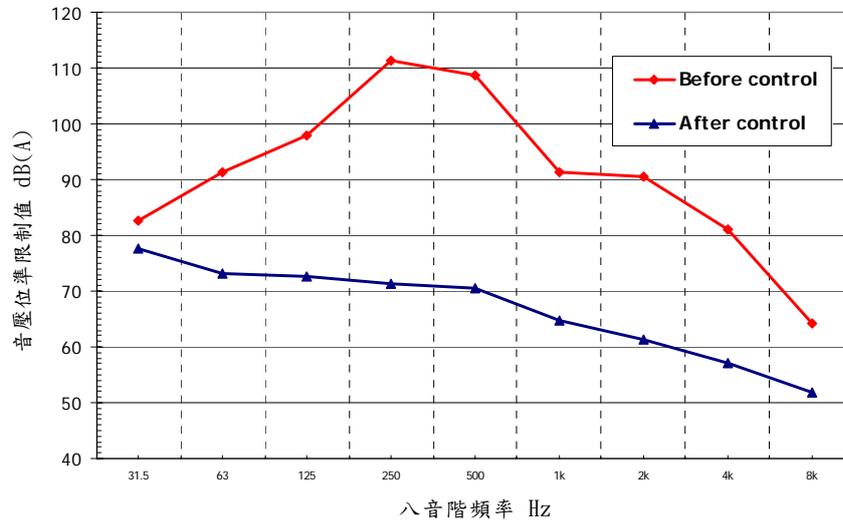


吸收式(直通式)消音器

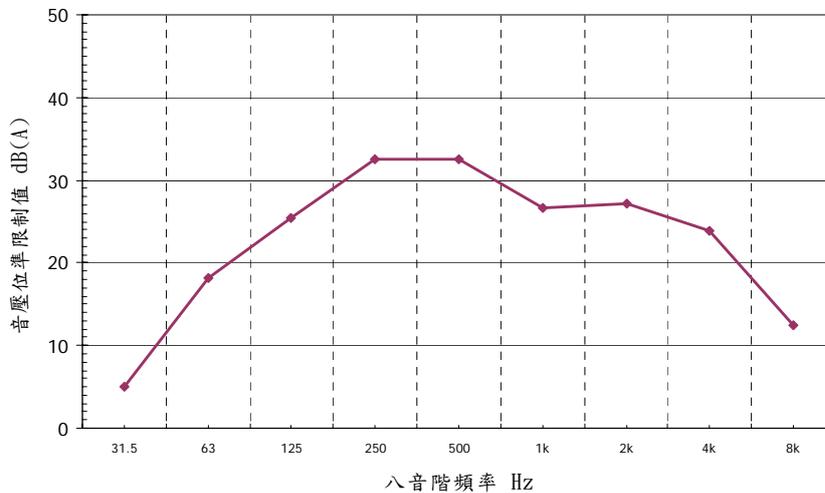


反應式(膨脹室)消音器

沉水式鼓風機在安裝消音器前後之八音階頻譜值及消音器插入損失值如下圖所示，4 部鼓風機進口端噪音量由 108 dB(A)減至 71 dB(A)，全部改善費用不到 20 萬元。



插入損失值



## 七、管制工廠(場)低頻噪音之影響

增訂工廠(場)低頻噪音管制標準，對工廠(場)低頻噪音產生源將造成衝擊；依據以往輔導產業時所檢測之結果(1/1 音階中心頻率 31.5Hz、63Hz 及 125Hz)，其音量均超過管制標準(草案)甚多；由於低頻噪音具不易防治

之特性，且工廠(場)音源設施種類繁多，為符合各時段之低頻噪音管制標準，目前國內仍欠缺相關防制技術或設備(一般吸音材料及隔音材料對低頻率音波之吸音係數及傳導損失值均偏低)，對產業將造成重大經濟衝擊。再者，大部分政府單位與機構廠商目前使用之噪音計無法符合低頻噪音量測範圍(1/3 音階中心頻率)之新規定(僅能量測 1/1 音階中心頻率)，必須重新購置(新購費用約 23-30 萬元\*)或擴增功能(費用約 10 萬元\*)，將增加業界及相關機構檢測設備之購置成本。

## 八、結論

隨著法令的公告施行低頻噪音問題將浮上檯面而逐漸被重視，商業化的消音器及隔振器已廣泛而有效地應用於流體及結構音之低頻噪音控制；然而科學家並不滿足於此，期望在材料上能打破質量密度定律的限制，讓隔離空氣傳播之低頻噪音變得簡單易行。目前國外在聲學材料上已有重大突破，應用物理學的振動原理讓複合材料具備固有機械諧振，可將聲波完全反射達到隔離噪音的目的，藉由適當地調整材料的微結構，可以隔離不同的低頻噪音範圍，但所需隔離的厚度僅為傳統材料的十分之一或更少。目前已經在不需要增加材料厚度的條件下，將材料反射噪音的範圍推低至 150 Hz，預期這種新材料的應用將非常廣泛，甚至可以用在建築物的地基結構中來反射抵消部份地震波強度，從而達到抗震的作用。預計未來幾年內此種材料更可以推廣到次音波和超音波的範圍，帶來更多新奇的應用，屆時環境噪音中的低頻噪音或許將不再難以消除且令人煩惱。