

水中降雨噪音特性之實驗研究

黃清哲¹、許世盛²、沈茂霖³、葉智惠⁴、

沈建成⁴、吳漢傑⁵、高家俊⁶

摘要

本研究主要是以實驗方法探討雨滴降落水面氣泡形成之過程及產生噪音之特性。實驗分為兩部分，其一是以數位式高速照相機拍攝雨滴撞擊水面時氣泡形成之過程；另一部份則是以水中收音器量測雨滴撞擊水面產生之噪音，並用 Gabor transform 將瞬時訊號轉換成時間-頻率域進行分析。結果顯示雨滴撞擊水面產生之氣泡有兩種模式。第一種模式為只有單一氣泡產生，文獻上常藉這種氣泡來解釋降雨噪音的來源；第二種模式為產生一渦流環(vortex ring)，其周圍生成一環狀排列的小氣泡，頻率在 2~20kHz 之間，且在 14kHz 左右聲壓最大。

Experimental Study on the Underwater Rain-Drop Noise

C.J. Huang, H.H. Hsu, M.L. Shen, C.H. Yeh, J.C. Shen, H. J. Wu, C.C. Kao

ABSTRACT

The underwater sound and the bubble formation caused by rain drops were studied experimentally in the present paper. A CCD camera was set up to photograph the drop impact and the process of bubble formation. Underwater noise was received with a hydrophone connected to a charge amplifier and a data acquisition system. The Gabor transform was employed to transform the sound signal in the time domain into the time-frequency domain. The experimental results showed that two types of bubbles are generated as a single rain drop strikes the free surface.

1. 前言

水中降雨噪音特性之研究，起源於第二次世界大戰中對潛艇偵測之需求。海洋中噪音來源很多，包括海中生物、海浪、潮流、降落物（如降雨、雪及冰雹等）以及船隻航行的噪音（Knudsen et al.,

1948）。由於不同噪音源所發出之聲音頻率不同，因此早期的研究主要是探討海洋環境噪音之特性，作為分辨出潛艇噪音的基本資料。

雨滴降落水中所激起的水花(splashes)及聲音的現象已有許多學者研究。Worthington (1908)曾以電花(electric spark)作為光源有系統拍攝到雨滴降落水面時水花的外觀。Minnaert (1933)提出雨滴降落水面產生的水中噪音主要是由於氣泡振動所致，並推導出氣泡之共振頻率。Franz (1959)探討物體從空氣撞入水中，並歸納出噪音產生之機制主要是（一）物體撞擊水面，（二）物體之共振，（三）水中氣泡。由於不是每次都會有氣泡產生，因此他質疑氣泡不是主要噪音源。在現場降雨噪音的量測

1. 國立成功大學水利及海洋工程學系副教授
2. 國立成功大學水利及海洋工程學系研究助理
3. 國立成功大學水利及海洋工程學系學士生
4. 國立成功大學水利及海洋工程學系碩士生
5. 中科院萬象館
6. 國立成功大學水利及海洋工程學系教授

上, Nystuen (1986) 在湖中量測降雨噪音時發現在 15kHz 時有一聲壓峰值。Scrimger 及其同事 (1985, 1987, 1989) 在陸續的觀測中發現類似的降雨噪音特性。此外, Medwin et al. (1992) 注意到在現場降雨噪音量測中, 雖然風與浪會改變雨滴撞擊水面之速度與角度, 但降雨噪音在 14kHz 附近都會有一明顯的峰值的現象則不受到影響。Pumphrey 及其研究群 (1989, 1990) 於實驗室中有系統地量測不同雨滴大小從不同高度降落時水中噪音之特性, 並同時以高速數位照像機拍攝水中氣泡形成之過程。此外, 還歸納出水中產生氣泡所需之雨滴大小及撞擊速度條件。Pumphrey 及其同事的研究顯示雨滴降落水面時由於撞擊到水面會先有一衝擊聲波, 之後由於水中產生單一氣泡, 還會量測到此氣泡所輻射出之聲音, 此聲音之振幅會逐漸衰減。Pumphrey 的研究成果到目前為止常被用來解釋降水中噪音產生之主要機制 (Prosperetti and Oguz 1993)。在雨滴降落之實驗, 也有學者發現水中會有渦流環 (vortex ring) 產生 (Thomson and Newall, 1885; Okabe and Inoue, 1961)。Hsiao et al. (1988) 嘗試去界定產生渦流環的韋伯數 (Weber number), 渦流環產生之機制目前尚很少有文獻探討。

了解水中雨滴噪音之特性, 將有助於藉由測量水中噪音估算出海面之降雨量。台灣是個四面環海的國家, 主要的降雨量皆來自於颱風, 長久以來只有靠衛星雲圖推測降雨率, 對於降雨量一直缺乏一套良好的預估方法, 而降雨量的大小又直接關係到水資源分配、土石流的發生、水庫渲洩、河川防洪... 等等攸關民生的問題。所以如果能在颱風登陸前, 就先經由水下聲波的量測而得知其降雨量, 則可對本島的水資源應用和防災有莫大的助益。本研究之後續發展, 可應用於颱風降雨量之預測, 對台灣來說尤其重要。

鑑於此項研究課題的重要性, 本文以實驗方法探討水中噪音之特性。實驗分為兩部分, 其一是以數位式高速照相機拍攝雨滴降落水面時水中氣泡形成之過程, 另一部份則是以水中收音器量測雨滴降落水面產生之水中噪音。由於 Pumphrey 之實驗中雨滴距離水面高度較低, 因此在本文的實驗中我們加大雨滴降落高度。實驗結果顯示, 在雨滴高度較小的情形下, 我們得到與 Pumphrey 相似的結果, 亦即

會有單一氣泡產生, 而當雨滴高度較大時, 我們發現會有兩種不同型態的氣泡產生, 我們稱之為模式 I 及模式 II。模式 I 之氣泡一般只有一個, 其體積較大, 振動頻率較低。模式 II 氣泡則是由於雨滴降落時會在水中產生渦流環, 沿著渦流環流體壓力降到蒸氣壓力 (vapor pressure), 因此會產生一圈排列成圓形, 不同大小之氣泡。模式 II 氣泡一般體積較小, 頻率較高, 且頻域較寬。

2. 實驗佈置及方法

本實驗是在國立成功大學水利及海洋工程研究所之水中聲學實驗室裡進行。實驗佈置主要分為兩部份: 一是以量測降雨噪音為主的水下聲音接收系統; 另一個則是拍攝雨滴撞擊水面氣泡形成的詳細過程, 以了解噪音產生的物理機制。為避免水的表面張力受到溫度的影響, 實驗室內利用空調控制室溫在 $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 。

2.1 氣泡產生過程拍攝

利用高速數位式照相機 (DALSA CA-D6) 拍攝單雨滴撞擊水面氣泡產生過程。此高速照相機其解析度為 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$, 每秒可拍 955 畫面 (frames/sec)。影像資料傳輸至電腦, 運用影像軟體處理並且儲存。詳細實際儀器配置, 請見圖 1。實驗係在小水槽中進行。小水槽尺寸為 $0.3 \times 0.3 \times 0.5$ 立方米, 使用鹵素燈做光源, 鹵素燈前置一薄紙, 以促其光源均勻。我們將雨滴由水面上方 20 cm 至 140 cm 處依次滴落。

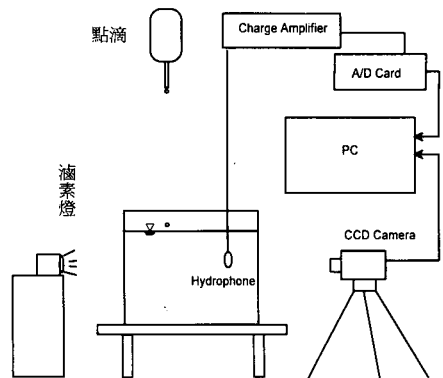


圖 1 雨滴撞擊水面過程實驗儀器佈置圖

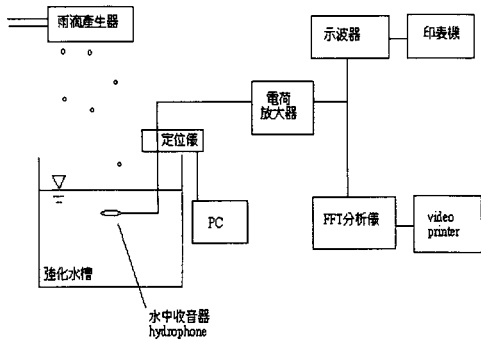


圖 2 降雨噪音量測實驗儀器佈置圖

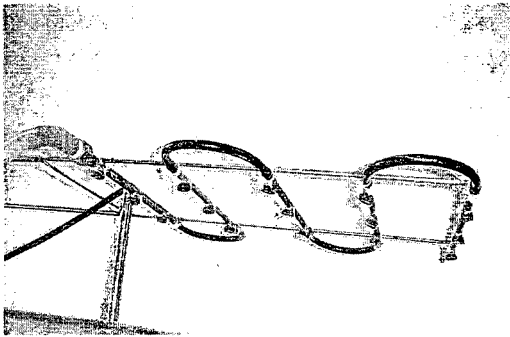


圖 3 實驗儀器「灑水器」之照片

2.2 噪音量測

單雨滴降落水中之噪音量測主要流程為利用點滴產生單雨滴滴入水面。雨滴直徑為 4.6 mm。雨滴降落位置由距離水面 20 cm，之後依次增加 10 cm，最高位置距離水面 140 cm。水中收音器 (Hydrophone, B&K 8104) 則放置於距雨滴落下位置 3 cm 處收集水中聲音。信號經由水中收音器傳至電荷放大器 (Charge Amplifier, B&K 2635)，經調整後進入示波器 (HP 54600B) 或 AD 卡 (PCI-MIO-16E-2) 中做數值解析與紀錄。詳細儀器配置請參閱圖 2。為了使噪音量測與氣泡產生過程拍攝同步進行，實驗皆在小水槽進行。本文中噪音數位訊號將經由 Gabor transform (許世盛, 2000) 分析水中降雨噪音特性。

多雨滴之噪音量測係利用灑水器 (參閱圖 3) 產生多雨滴滴入大水槽中的靜止水面，以模擬實際降雨之情形。而控制降雨強度的方法是將灑水器的水源供應開至一定流量，在灑水器底下以一較灑水器面積稍小的容器接收雨量，一段時間後量取其中

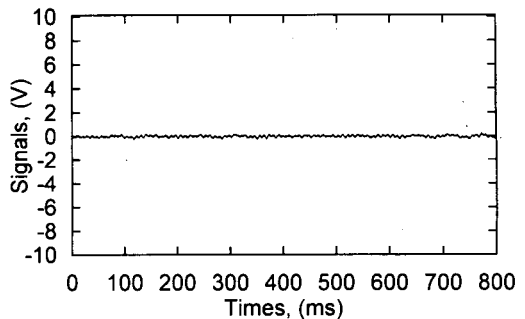
深，再轉換成每單位小時的降雨量，此部份共做了三次不同降雨強度，而降雨高度皆控制為 120 cm。訊號接收方法則如同單雨滴實驗，但因多雨滴的情況甚為複雜，實驗則不再以示波器的時域 (Time Domain) 方式的顯示訊息，改以 FFT 快速傅利葉轉換儀的頻域 (Frequency Domain) 方式顯示，希望求得多雨滴模式的噪音頻率分佈特性。至於訊號處理，是以 FFT 快速傅利葉轉換儀存取一段時間中的連續訊息或取一定數量資料之平均值，再加以討論。

3. 實驗結果與討論

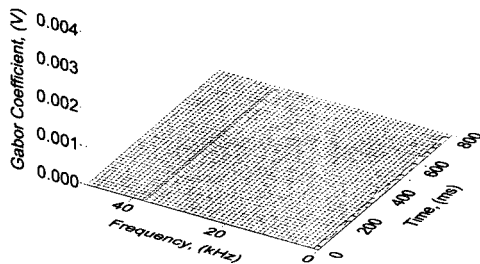
我們先探討不同高度單雨滴降落水面造成水中噪音之特性。由於單雨滴降落時，水面之變化較為單純；除了量測其噪音特性之外，也以高速攝影機拍攝雨滴降落時水面之變化及氣泡形成之過程。多雨滴之噪音特性，本文也做了討論。

3.1 背景噪音

由於我們要量測的是雨滴產生的水中噪音，因此在量測前要知道水槽中的背景噪音。圖 4 為沒有雨滴降落時，水中收音器在水槽中所量測到的背



(a) 環境噪音之時域分佈圖



(b) 環境噪音之頻域分佈圖

圖 4 環境噪音分析

表 1 直徑 4.6mm 的雨滴由不同高度撞擊水面產生之氣泡模式統計表

降雨高度(cm)	40	80	120	140
沒有氣泡	67	9	13	2
模式 1 氣泡	33	46	14	34
模式 2 氣泡	0	45	73	64

景噪音之瞬時訊號(a)及經 Gaabor transform 轉換後在時間-頻率域上的訊號。圖 4 顯示在 1kHz 到 20kHz 之間基本上沒有較明顯的背景噪音。由於我們所量測到的雨滴噪音頻率大多在 2kHz 到 20kHz 之間，因此不會與背景噪音混淆不清。

3.2 氣泡之形成過程

本研究在實驗室觀測雨滴降落水面時，以直徑 4.6 mm 之雨滴從不同高度降落水面。由於受到空間限制，雨滴距離水面最大高度為 140 cm，因此雨滴撞擊水面時，皆未達到終端速度 (terminal velocity)。直徑 4.6 mm 之雨滴從不同高度降落水面產生或不產生氣泡的實驗觀測結果列於表一。表一所列為在同一高度觀察 100 次雨滴降落水面時，氣泡產生的情形。由表一可看出在雨滴高度較小時，如 40 cm 時，產生的氣泡主要是模式 I 之氣泡。當雨滴起始高度增加到 60 cm 時，我們發現會開始有模式 II 的氣泡出現，一直到 140 cm 都是一樣的情形。

由於雨滴距離水面高度小於 60 公分時，較容易產生模式 I 氣泡，而模式 II 氣泡出現機率相當少，因此我們首先拍攝 4.6mm 之雨滴從 60cm 高落下時，模式 I 氣泡形成之過程及其噪音特性，結果分別示於圖 5 及圖 6。圖 5 中照片旁的號碼表示其排列順序，相鄰兩張照片的時間間距不一定相同。

圖 5 中含有 12 張照片。照片(1)是水滴剛滴入水面的過程；所謂的衝擊噪音 (splash) 是在此過程產生的。由照片(2)及(3)可看出當水滴衝擊水面時，會使水面受力向下產生一碗形凹面。當凹面水體壓力，大氣壓力及表面張力三者達到平衡時，由於水體的慣性作用，凹面不會停止移動而是繼續擴大，直到其表面運動速度為零。此時凹面水體壓力及表面張力之合力大於大氣壓力，使得凹面開始收縮，並形成一衝出水面之水柱，請參閱照片(4)及(5)。此水柱降落時，除了因表面張力作用形成一球

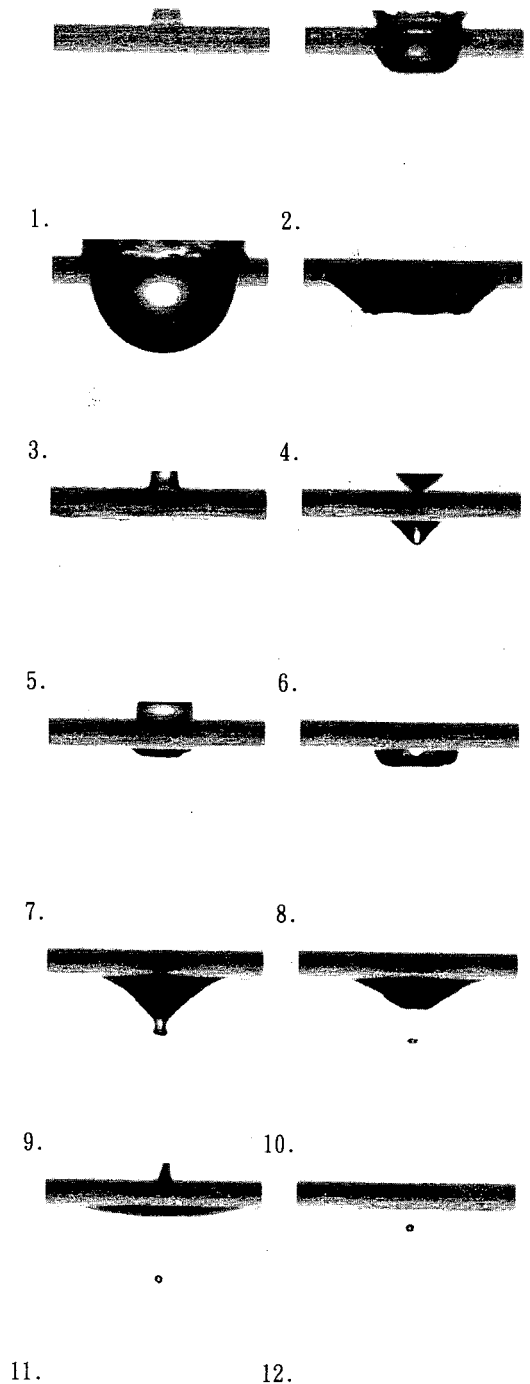
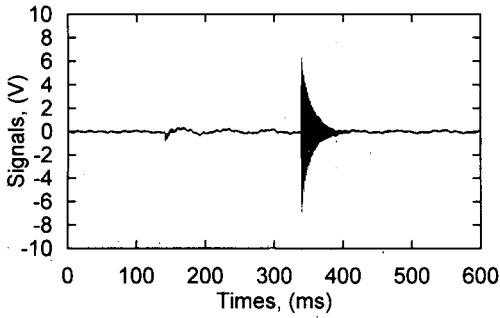
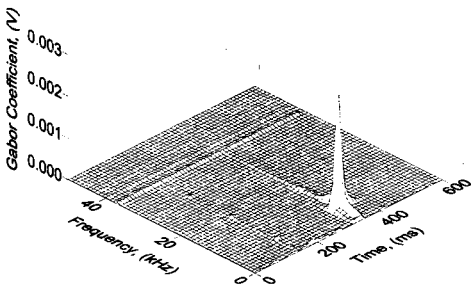


圖 5 直徑 4.6mm 的雨滴從距離水面 60cm 高撞擊水面時，模式 I 氣泡的形成過程。

形圓頂外；會把空氣擠入水中形成一個三角錐形之空隙，參閱照片(6)。可能由於水體靜壓力作用，此



(a) 雨滴噪音時域分析圖



(b) 雨滴噪音時間-頻域分析圖

圖 6 圖 5 中雨滴降落水面所產生之噪音訊號分析

空隙在形成不久後逐漸消失，參閱照片(7)。上述之水柱在降落過程中，又變成一水珠降落於水面上，並形成第二次凹面。此凹面會發展成一角錐形，參閱照片(8)及(9)。角錐形凹面在收縮過程中，其尖端會分離出一氣泡，參閱照片(10)至(12)。第二次凹面收縮過程與第一次凹面相同，也會產生水柱衝出水面，但規模已經小很多。圖 5 中照片(1)-(12)之時間依序為 141、145、163、188、268、291、297、316、339、341、356 及 399ms。圖 6(a)為圖 5 中雨滴降落水面時噪音信號之時域圖，而圖 6(b)為經由 Gabor transform 轉後噪音信之時間頻率域圖。由圖 6 可看出雨滴在 $t=141\text{ms}$ 時撞擊水面，但其聲音並不明顯。在 $t=339\text{ms}$ 時有明顯氣泡噪音信號，其頻率約為 7kHz。

在前人的研究中一般認為降雨產生的氣泡為模式 I 氣泡；但是在本實驗研究中我們發現當雨滴距離水面高度變大時，會有另一種模式氣泡產生。當雨滴降落水面所產生的水柱落下時，會形成向下

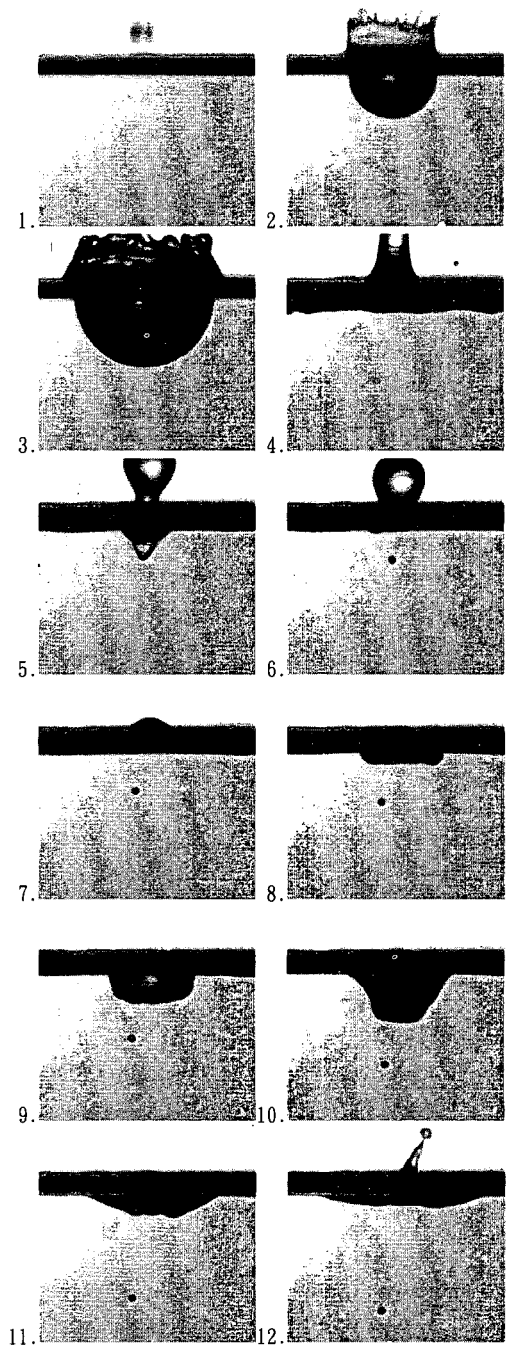


圖 7 直徑 4.6mm 的雨滴從距離水面 110cm 高撞擊水面時，模式 I 氣泡的形成過程。

之射流，並演變成一渦流環(vortex ring)，由於渦流環的速度頗大，根據伯努利定律，水體之壓力降低。當壓力低於水體室溫下之蒸氣壓時，會在沿著

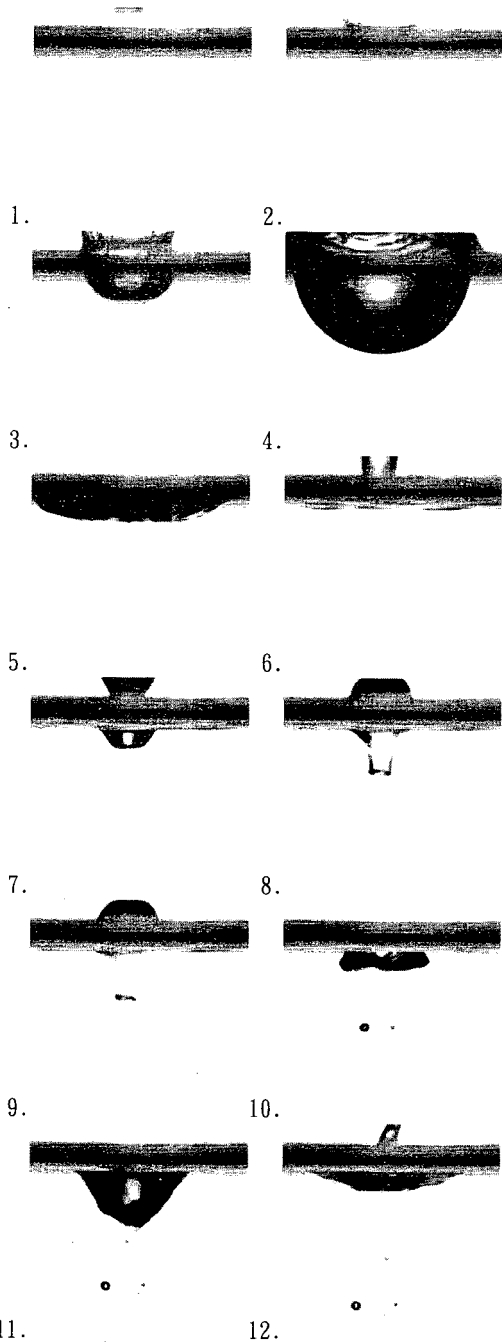
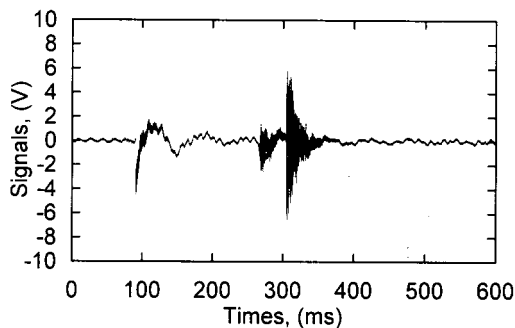


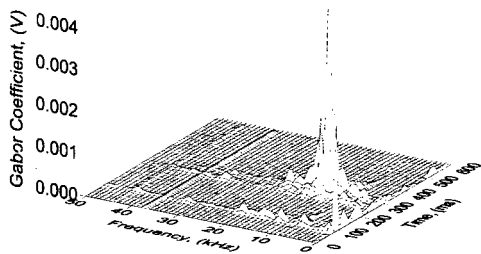
圖 8 直徑 4.6mm 的雨滴從距離水面 110cm 高撞擊水面時模式 II 氣泡的形成過程

渦流環處產生許多小氣泡。

4.6mm 之雨滴從 110cm 高撞擊水面，模式 I 及模式 II 氣泡形成過程，分別示於圖 7 及圖 8。圖 7 中只有單一氣泡產生，其形成過程與圖 5 非常類



(a) 雨滴噪音之時域分析



(b) 雨滴噪音之時間-頻率域分析

圖 9 圖 8 中雨滴降落水面所產生之噪音訊號分析

似，在此不再贅述。圖 8 中共包含 12 張照片。比較圖 8 與圖 7 可發現，在圖 8 中照片(1)到(4)所顯示的自由水面變化過程與模式 I 之情形非常接近；亦即雨滴撞擊水面時會形成一碗狀凹面，凹面收縮時會產生水柱衝出水面。當水柱向下降落時，模式 I 的情形是在水柱下方會產生一氣泡；而模式 II 則是水柱變為水滴後撞擊水面形成向下之射流，並演變成一渦流環(參閱照片(7)和(8))。渦流環之流體，由於速度大壓力低；因此產生一圈小氣泡，見照片(10)及(11)。這一圈氣泡產生的時間非常接近，但其大小則不一致。此外，照片(11)中角錐狀空隙收縮時還額外產生一小氣泡。成環狀排列的氣泡產生後，會向下移動(照片(9)~(12))，然後由於浮力作用，會浮到水面消失不見。在我們的觀察中，向下移動的氣泡速度較為一致，且有時可深達水槽底部。

由於渦流環係由清澈的水組成，雖然肉眼看到，但照不出來。為了證明渦流環的存在，我們將一染上橘黃色的雨滴降水中，等到射流演變為渦流環時，再以單眼照相機(可調整底片感光度及曝光

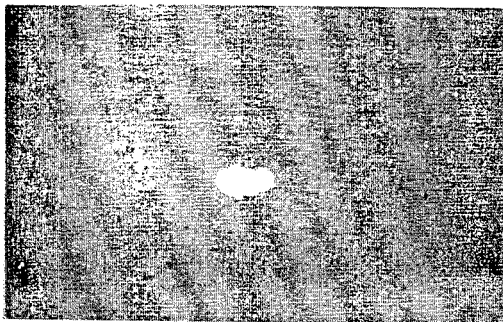


圖 10 染色雨滴產生渦流環之快照

時間)拍攝此一渦流環。圖 10 為直徑 4.6mm 的染色雨滴從高度 120 cm 處落下，撞擊水面後產生渦流環的快照。由圖 10 中看不到氣泡主要是因為受到染料污染，水變得混濁所致。由圖 10 我們也發現一個有趣的現象，亦即渦流環的成份來自於雨滴。由於渦流環源自於射流，我們推測當雨滴撞擊水面時，衝出水面之水柱其成份主要來自於雨滴。

3.3 單雨滴噪音分析

圖七中雨滴降落水面之噪音特性與圖六非常類似，主要由單一氣泡所產生，於此不再討論。圖 8 中雨滴降落水面所產生之噪音量測結果示於圖 9，其中 (a) 圖為噪音信號之時域圖，而 (b) 圖為經由 Gabor transform 轉換後噪音信號之時間-頻率域圖。由圖 9(a) 中可知雨滴約在 $t=100\text{ms}$ 時撞擊水面，此撞擊噪音維持時間相當短暫，約為 10ms。由圖 9 (b) 可看出此撞擊噪音及隨後水面波動所產生之壓力變化頻率較低，小於 1kHz。圖 9 (a) 中有兩個明顯的氣泡噪音信號，其一發生在 260 ms，另一在 300ms。前一個噪音信號為圖 8 照片 (10) 中氣泡所輻射出來的，而第二個噪音信號則是圖 8 照片 (11) 中角錐狀空隙收縮產生之氣泡所輻射出來的。由圖 9 (b) 可看出在 $t=260\text{ms}$ 出現的噪音其頻率在 10-15 kHz 之間，有 4 個聲壓峰值；而在 $t=300\text{ms}$ 出現的噪音只有單一聲壓峰值，頻率約為 14 kHz。一般利用噪音量測反算氣泡數量時，常利用聲壓峰值出現次數算出氣泡數量 (許世盛, 2000)。因此，在 $t=260\text{ms}$ 出現的噪音主要是由 4 個氣泡所輻射出來的；而在 $t=300\text{ms}$ 出現的噪音，則由單一氣泡所產生。對於於圖 8 照片 (10) 及照片 (11) 中氣泡數量，可知兩者吻合。

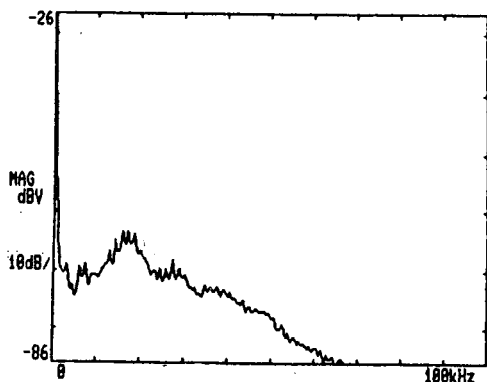


圖 11 多雨滴降雨噪音於 FFT 儀頻域中連續 512 個記錄的平均圖。其中每段數據相距 0.5 秒；降雨強度為每小時 326 mm，降雨高度為 80 cm。

3.4 多雨滴降雨噪音

圖 11 所示為多雨滴降雨的噪音頻域圖。圖中的結果為連續取 512 個資料然後再做平均，其中每段數據相距 0.5 秒；降雨強度為每小時 326 mm，降雨高度為 120 cm。圖 11 所示噪音特性與文獻上降雨現場量測之噪音信號特性一致 (Pumphrey et al., 1989)，亦即在 14kHz 附近皆有峰值的現象。

4、結 論

本文藉由高速照相機及水中聽音設備探討不同雨滴大小及高度撞擊水面時，氣泡形成的過程及水中噪音的特性。雨滴距水面的距離由 20 cm，逐次增 10 cm 直到 140 cm。實驗結果顯示當雨滴距離水面高度較小時 ($< 40\text{cm}$)，雨滴撞擊水面會產生單一氣泡 (模式 I)，而隨著雨滴高度增加，除了模式 I 氣泡外，也可能產生一渦流環，並於渦流環上產生一圈小氣泡 (模式 II)。本文藉由高速照相機拍攝到模式 I 氣泡及模式 II 氣泡形成過程完整的照片。此外，也以單眼照相機拍攝到渦流環。第一種模式氣泡由於直徑較大，且一般只有一個或兩個氣泡，因此其噪音頻率較低。而第二種模式氣泡，由於有數個大小不一的氣泡，其噪音頻域較寬，在 2 到 20kHz 之間，而主頻則在 14kHz。由於雨滴距離水面愈高時愈容產生模式 II 之氣泡。由此可看出為何現場水中降雨噪音主頻約在 14kHz。

參考文獻

1. 許世盛 (2000) “近岸碎波產生氣泡之特性,” 國立成功大學水利及海洋工程研究所, 碩士論文。
2. Franz, G. J. (1959), “Splash as Source of Sound in Liquids,” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 31B, pp.1080-1096.
3. Hsiao, M., Lichter, S., and Quintero, L. G. (1988), “The Critical Weber Number for Vortex and Jet Formation for Drops Impinging on a Liquid Pool,” *Phys. Fluids*, Vol. 31, pp.3560-3562.
4. Knudsen, V.O., Alford, R.S., and Emling, J.W. (1948), “Underwater Ambient Noise,” *J. Marine Res.*, Vol. 7, pp.410-429.
5. Medwin, H., Nystuen, J. A., Jacobus, P.W., Ostwald, L.H., and Snyder, D.E. (1992) “The Anatomy of Underwater Rain Noise,” *J. Acoust. Soc. Am.*, 92 (3), pp.1613-1623.
6. Minnaert, M. (1933), “On Musical Air Bubbles and The Sounds of Running Water,” *Phil. Mag.*, Vol. 16, pp. 235-248.
7. Nystuen, J.A. (1986), “Rainfall Measurements using Underwater Ambient Noise,” *J. Acoust. Soc. Am.*, 69 (4), pp.972-982.
8. Okabe, J. and Inoue, S. (1961), “The Generation of Vortex Ring, II.” *Rep. Res. Inst. Appl. Mech., Kyushu Univ.*, Vol. 9, pp. 147-152.
9. Prosperetti, A. and Oguz, H. N. (1993), “The Impact of drops on Liquid Surfaces and the Underwater Noise of rain,” *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 25, pp. 577-602.
10. Pumphrey, H.C., Crum, L. A., and Bjørnø, L. (1989), “Underwater Sound Produced by Individual Drop Impacts and Rainfall,” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 85, No. 4, pp. 1518-1527.
11. Pumphrey, H. C. and Crum, L. A. (1990), “Free Oscillations of Near-Surface Bubbles as a Source of the Underwater Noise of Rain,” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 87, No. 1, pp.142-148.
12. Scrimger, J.A. (1985), “Underwater Noise caused by Precipitation,” *Nature*, No. 318, pp.647-649.
13. Scrimger, J.A. and Evans, D.J. (1987), “Underwater Noise due to Rain, Hail, and Snow,” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 80, No. 1, pp.79-86 .
14. Scrimger, J.A., Evans, D.J. and Yee, W. (1989), “Underwater Noise due to Rain-Open Ocean Measurements,” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 85, No. 2, pp.726-731.
15. Thomson, J.J. and Newall, H.F. (1885), “On the Formation of Vortex Rings by Drops Falling into Liquids, and Some Allied Phenomena,” *Proc. R. Soc. London*, Vol. 29, pp. 417-436.
16. Worthington, A.M. (1908), “A Study of Splashes,” reprinted 1963, Macmillan, New York.