

# 自動撒水系統暫態流場模擬分析之研究

陳宗傑

德霖技術學院 機械工程系

## 摘要

在工商業發達的今日，水系統管路跟人民的生活息息相關，其中自動撒水系統是高樓層建築物本身防災滅火最重要的設備，如果泵浦運轉時因過載而跳機，或是保養人員測試泵浦時不當操作，甚至泵浦運轉中因故障而停機，均會造成撒水泵浦突然停電而致動力中斷；此外，撒水頭瞬間破裂放射，或是排水閘、逆止閘突然關閉、開啟時，均會造成配管內瞬間流體壓力急遽變化，而形成所謂水錘現象，進而破壞閘件及管路，其爆管後造成的水損不可輕忽。但是管路系統內的暫態流場是複雜度甚高的計算系統，因此，本研究即採用電腦水力模擬軟體來模擬自動撒水系統穩態、暫態時之流場行為，以及發生水錘效應之結果，再做進一步的探討分析。

**關鍵字：**自動撒水系統、水錘效應、極端遽變壓力

## The Research of Analysis of Transient Flow by Simulation in Fire Sprinkler Systems

Tsung-Chieh Chen

Department of Mechanical Engineering, De Lin Institute of Technology

### Abstract

In today's industrial and commercial development, water piping system is closely related with people's life. Fire sprinkler system is the most important equipment for fire prevention in a high floor building. With the inappropriate operation due to overload trip or improper operation, it will cause a sudden power interruption. In addition, with sprinkler broken or suddenly closure of check valve or suddenly open of outlet, it will cause rapid changes of fluid pressure inside the pipe, and then cause the so-called water hammer. When water hammer happening, it will destroy the valves and pipe. But the transient flow within the pipe system is very high complexity to analysis. Therefore, this study uses computer simulation software to simulate the steady and transient behavior of the fire sprinkler systems and the result if water hammer occurred. And then further discuss and analysis are elaborated.

**Keywords :** Fire Sprinkler System, Water Hammer、Surge

## 壹、研究目的

自動撒水滅火系統因其系統簡單、滅火效率高、使用價廉的水作為滅火劑、能應付多種情況的火災、安全可靠、投資成本低，所以是消防滅火設備中極為普遍的設備。現在經濟發展迅速，各地城市大樓矗立競相爭高，而消防搶救的雲梯車救災高度又有其限制，所以高樓層建築物只能仰賴建築物內部自身的滅火設備來自救，而大樓內部自身的滅火設備就以自動撒水滅火系統為最經濟有效的滅火設備，因此對於自動撒水系統，其泵浦、撒水頭及管路都必須作謹慎的設計、安裝、維護及保養。目前消防撒水泵浦之控制大部分採用管系降壓啟動、升壓停止的方式，但如果撒水泵浦啟動後到達壓力設定上限值就自動停泵，或是泵浦運轉時因過載而跳機，或是保養人員測試泵浦時不當操作，甚至泵浦運轉中因故障而停機，均會造成撒水泵浦突然停電而致動力中斷；此外，撒水頭瞬間破裂放射，或是排水閥、逆止閥突然關閉、開啟時，由於配管內流體的流速變化產生管內壓力急遽變化，而形成一連串壓力波在管路中振盪，此時暫態之流體壓力傳動即一般所謂水錘現象，均會造成管路及閥件的破壞，更嚴重者發生爆管，其造成的水損不可輕忽。因此設計者對於撒水系統管路的設計，除了考慮穩態時的流體行為，更需考慮暫態的水錘效應，對於管路中管材、閥件、接頭等的特性及規格不可不詳細考慮。但是管路系統內的水錘效應具備高流量、高壓力以及多樣壓力變換的特性，是為複雜度甚高的計算系統，以傳統人力計算的方式幾乎是不可能的任務，因此本研究即採用電腦水力模擬計算方式，來模擬自動撒水系統暫態時之水錘效應，再做進一步的探討分析。

## 貳、文獻回顧

對於管路中暫態的流體分析研究，國外已有相當多的研究，1897年Joukowsky[1]以一長達7.6公里的管路設備進行水錘實驗，並於1900年導出壓力變化與流速變化的關係式；1977年 Jones 與 Wood[2] 研究直線管內閥門關閉時間與產生水錘壓力大小的影響；1985年 Contractor [3] 探討二階段閥及三階段閥關閉時對降低水錘效應的研究；此外尚有諸多學者提出對水錘效應及相關問題之研究[4] [5] [6]；相對地，國內對於水錘方面的研究則非常少。2002年蕭輔洲及伍次寅 [7]、2003年周政哲及伍次寅[8]均曾利用數值方法探討管路系統在閥門關閉時所產生的水錘與閥門關閉行程之最佳化關係，但僅限於研究水錘之控制方程式；2014年邱晨瑋、黃美芳、徐國庭等三人[9]也曾進行高樓連結送水管水錘分析之研究，主要針對連結送水管處於紊流狀態之模擬驗證，歸納出數種可能造成水錘現象的原因及可能解決方案。本研究即針對防火救災上更普遍、更重要的自動撒水系統作管路系統穩態及暫態時之流場分析研究。

## 參、研究方法

在有壓力的管流中由於某些外界原因，例如泵浦突然啟動或停機、閥門快速關閉或開啟、或是出水口瞬間的開啟或關閉，均會使水的流速突然發生變化，由於流體具有動能和一定程度的壓縮性，因此在極短時間內流量的劇烈變化，引發壓力急劇升高和降低，一連串的正負壓力

波在管路內來回振盪，形成水錘效應。水錘具有極大的破壞性，壓力過高會破壞泵浦、接頭、閥件及管壁，造成漏水，甚至管路爆裂造成水損；反之，壓力過低形成氣蝕又會損壞閥門、止漏封環和管內壁面，所以對於管路系統中的水錘效應分析相當重要。水錘能量傳遞屬於一種機械振動的波動，水錘波透過彈性物質—水來進行傳遞，關於單一管路內水錘波的傳遞，其特徵方程式如式(1)所示：

$$\Delta H = \frac{c}{g} \Delta V \quad (1)$$

其中， $\Delta H$  為壓力水頭變化量

$\Delta V$  為管內流體的流速變化量

$g$  為重力加速度

$c$  為水錘壓力波的傳播速度

上述式(1)的關係式，是由Joukowsky [10]於1904年首先提出，其前提是假設水為均一的連續彈性體，無水柱分離(water column separation)現象，且忽略管壁膨脹因素。而式中水錘的傳播速度 $c$ 與管壁的材質、厚度以及管內流體性質有關，其關係可表示為式(2) [10][11]：

$$c = \sqrt{E_f / \rho \cdot \left(1 + \frac{K_R E_f D}{E_c \cdot t}\right)} \quad (2)$$

其中， $E_f$  為流體的彈性係數

$E_c$  為管壁材料的彈性係數

$K_R$  為管路縱向位移的限制係數

$D$  為管內徑

$t$  為管壁厚度

$\rho$  為流體密度

由式(2)可知，管徑 $D$  越大則水錘波速 $c$ 越小，水錘壓力變化也越小，反之則大；管壁厚度 $t$  越大則水錘波速 $c$ 越大，水錘壓力變化也越大，反之則小。所以，管壁薄、富有彈性的大口徑金屬管對降低水錘壓力是有利的。

然而如上述得到了式(1)壓力水頭變化量及式(2)水錘的傳播速度等關係式後，要對複雜的管路系統進行計算，即使是採用數值分析的方法，實際上也是非常困難的，所以一般都藉由電腦水力計算軟體來分析。本研究即採取模擬的方式，以電腦水力計算軟體模擬自動撒水系統穩態行為及暫態下發生水錘效應的情形。

## 肆、模擬實驗與結果

本研究中以 KYPIPE-Surge 2014 電腦水力模擬軟體對高層建築物中之自動撒水設備進行模擬分析，模擬條件如下：防護場所位置高程 100m，撒水泵浦位置高程 0m，泵浦額定揚程  $H=1200\text{kPa}$ ，額定流量  $Q=1600\text{ L/min}$ ，撒水系統主幹管管徑 150A，橫向幹管管徑 80A，支管管徑 25A。實驗結果如下：

### 4.1 穩態時的流場行為

撒水系統管路配置以樹狀配管模式設計，將場所之撒水頭分佈情形建立模型，輸入各個撒水頭之流量係數  $K$  值、高程，以及各管段之管徑、材質、長度、摩擦係數等屬性後，即可進行模擬分析。此時模擬情境是假設系統內最遠端的兩個撒水頭破裂放射，模擬結果該場所各管段的壓力及流量分佈如圖 1 所示，此時最末端撒水頭的壓力及流量分別為  $293.4\text{Kpa}$ ， $122.7\text{ L/min}$ ，符合撒水頭最低放射壓力及最小流量的要求，而且管系中最大壓力發生在泵浦的出水側，約為  $1457\text{Kpa}$ ，由於高層建築物自動撒水系統的管材、閥件、接頭等，通常都採用符合 CNS4626 的規格，即可以耐壓至  $1600\text{kPa}$ ，所以如本案例的撒水管路系統，在穩態的流場行為基本上是安全的。

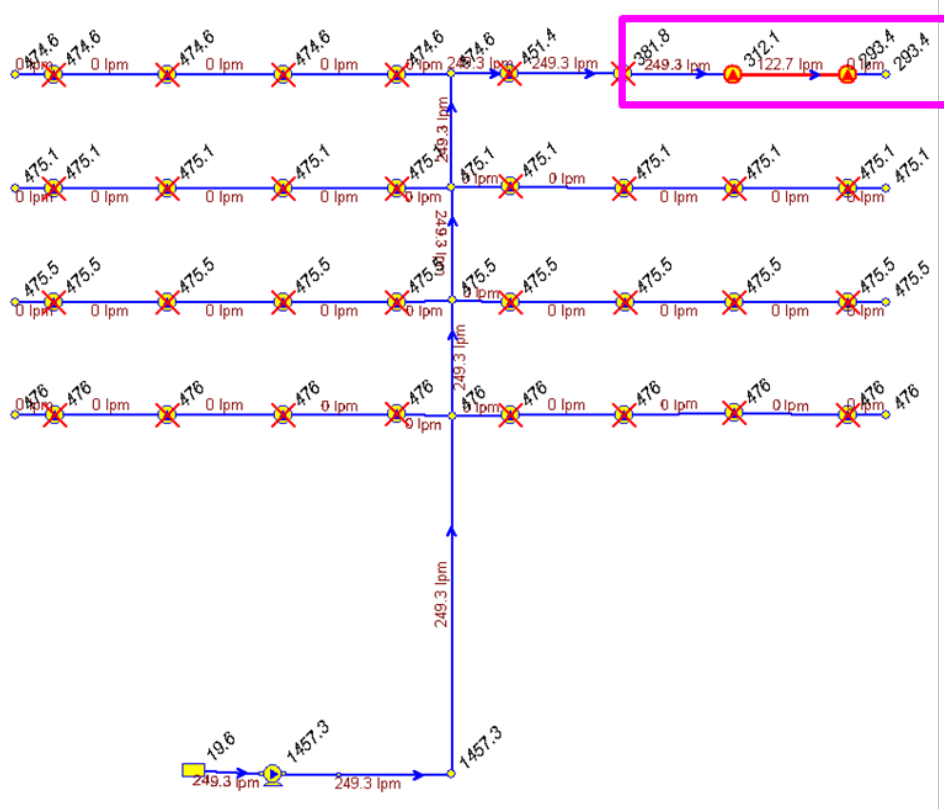


圖 1 最遠端兩個撒水頭破裂放射時壓力及流量分佈

## 4.2 暫態時的流場行為

延續前面所舉的自動撒水系統樹狀配管模式，以 KYPIPE-Surge 模擬泵浦運轉中發生停泵時所產生的水錘效應，並進一步比較採取減緩水錘效應改善措施前後的管路壓力分佈情形。如前述，圖 1 為撒水管路系統於兩個噴頭放射時，系統穩態下的壓力及流量分佈；今進一步模擬泵浦突然停泵時，造成的水錘效應，假設撒水泵浦於啟動後第 5 秒發生停泵事件，於 KYPIPE-Surge 軟體中輸入停泵條件，並執行 Surge 模擬分析後，得到各個時間點整個管路的壓力分佈圖，例如圖 2 為模擬第 4.95 秒停泵發生前管系的壓力分佈圖，從圖 2 可以看出，未放射的撒水頭壓力大約是 500KPa，放射中的撒水頭放射壓力大約是 300KPa，泵浦出水側端壓力是大約 1400KPa，此結果與圖 1 穩態下各點壓力分佈圖相符合；圖 3 為模擬第 8.07 秒停泵發生後管系的壓力分佈圖，由圖 3 可以看出，未放射處與放射中的噴頭壓力均掉到 200KPa 以下，而泵浦出水側端的壓力大於 1400KPa 以上的紅色區域卻擴大不少，立管的壓力梯度也變得比較陡峭，此現象表示管內已發生水錘效應。於 Surge 軟體畫面中，點選泵浦出水側水平幹管與垂直立管的交接彎頭處(A 點)，觀察此處的時間-壓力圖，如圖 4 所示，可以發現此處的壓力變化急遽，最高壓力可達 3500KPa 以上，很明顯的，水錘效應引發極高的瞬間壓力變化對於管路中的閥件、接頭具備相當程度的破壞力，極有可能從管系的最弱點發生爆管造成水損。

雖然水錘效應可能造成極大的破壞，但如果能預先防範未然，採取適當的措施，便可以防止或減緩水錘的發生。接下來針對上述撒水系統模擬採取防護措施的情境，即假設泵浦的出水側設置一組適當的水錘吸收器(直立型隔膜式，50 公升氣室)，Surge 軟體設定如圖 5 所示，再執行一次模擬分析，觀察同樣 A 點處的時間-壓力圖，結果如圖 6 所示，我們發現此處的壓力變化變小很多，即水錘吸收器已發揮減緩水錘效應的功用，圖 7 為裝置水錘吸收器改善前後 A 點的壓力變化比較圖。當然，裝置水錘吸收器並非減緩水錘效應的唯一方法，所有的防護措施必須配合整個管系條件，經過謹慎評估，選擇適當的種類型式、安裝位置及方式，才能真正發揮減緩水錘的功效。

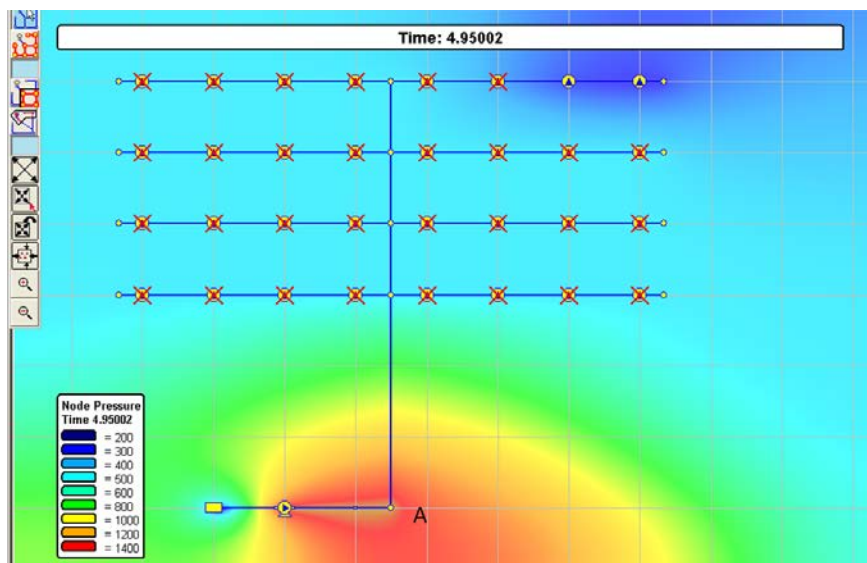


圖 2 模擬第 4.95 秒停泵發生前管系的壓力分佈圖

+

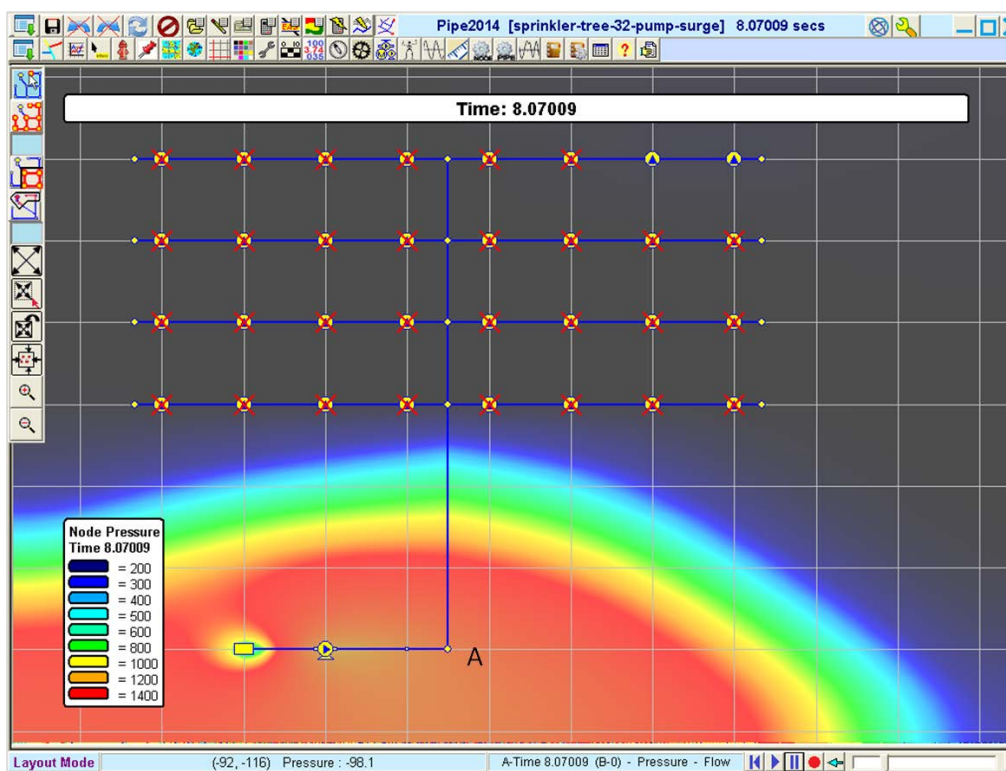


圖 3 模擬第 8.07 秒停泵發生後管系的壓力分佈圖

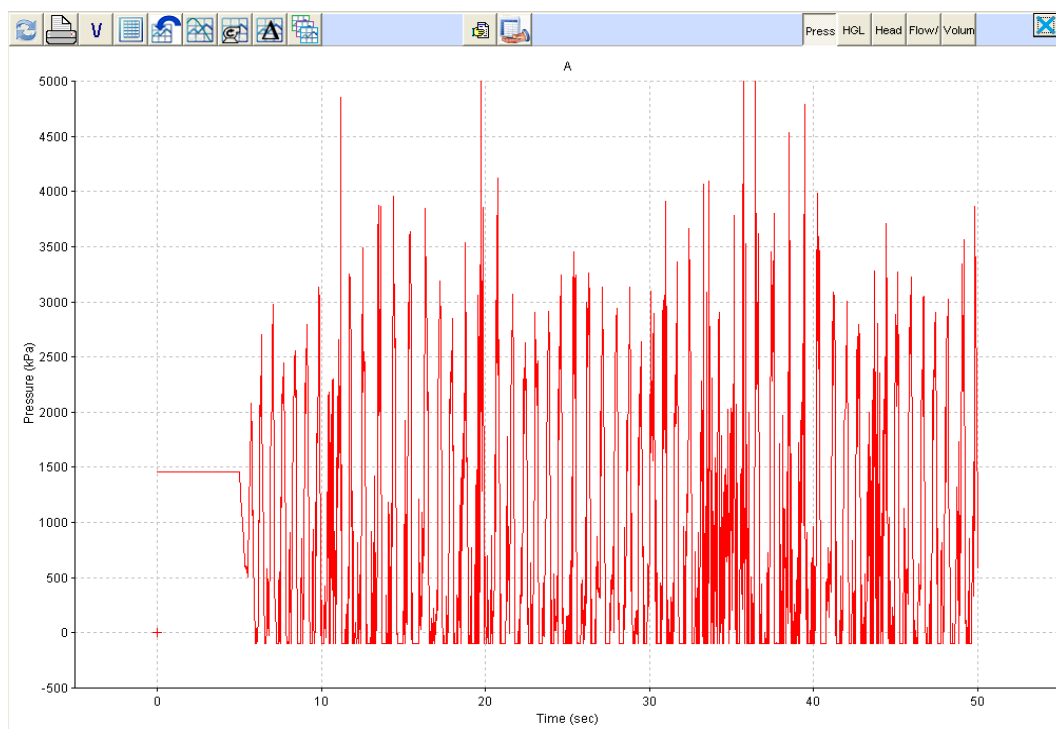


圖 4 泵浦出水側 A 點的時間-壓力圖(未裝水錘吸收器前)

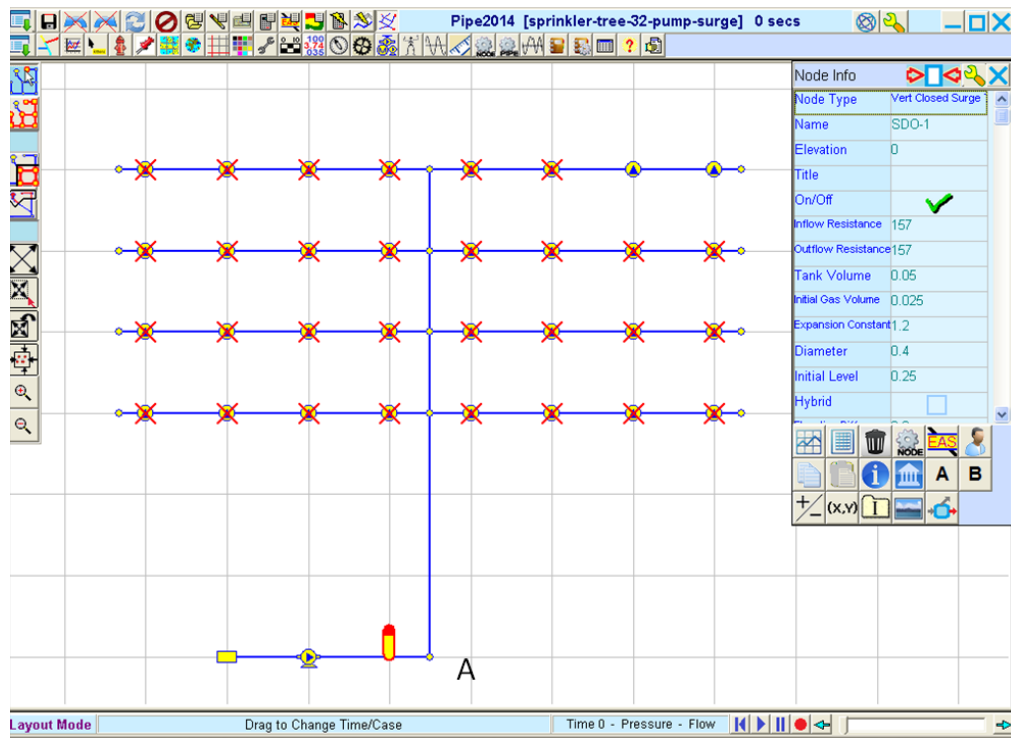


圖 5 於 Surge 軟體中泵浦出水側設置水錘吸收器

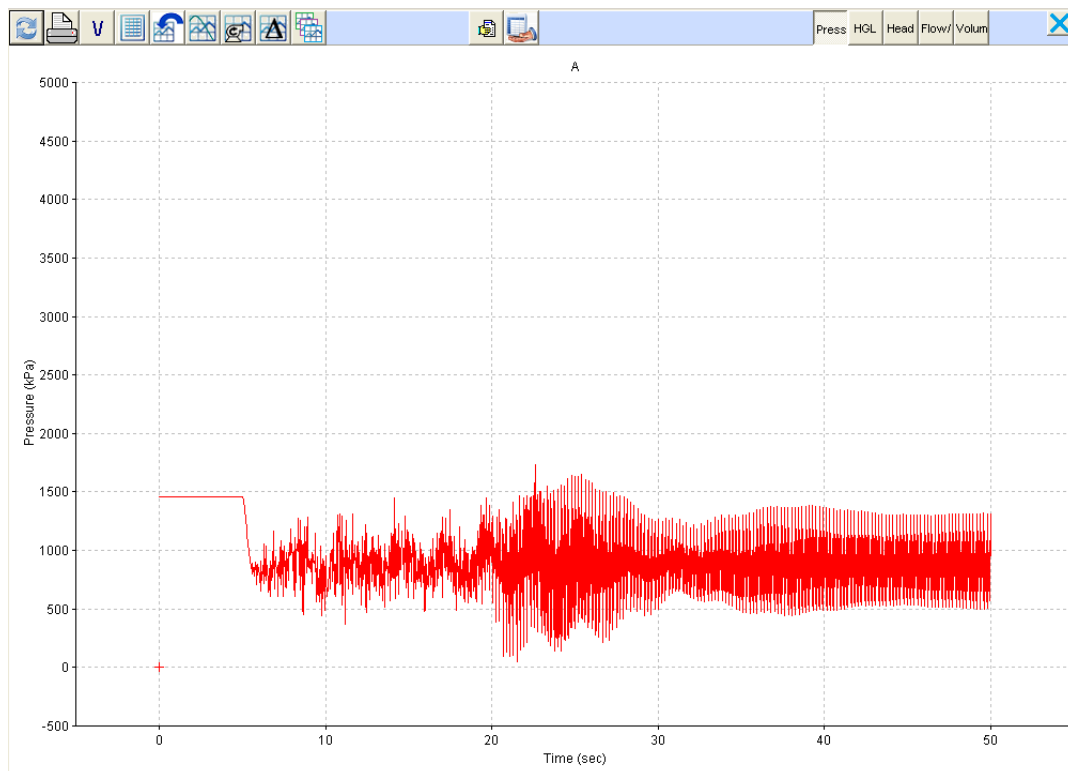


圖 6 泵浦出水側 A 點的時間-壓力圖(裝設水錘吸收器後)

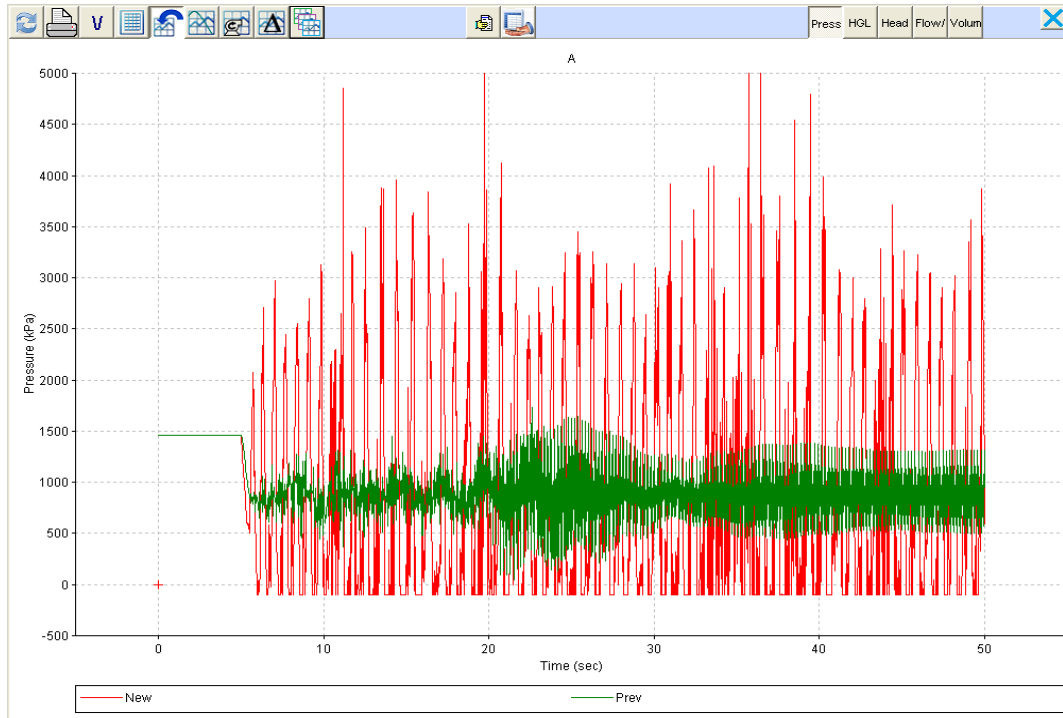


圖 7 裝設水錘吸收器前後 A 點的壓力變化比較圖

## 伍、結論

本研究以KYPipe水力計算軟體對撒水系統建立模型，模擬撒水系統穩態下的壓力、流量等分佈情形，再以KYPipe-Surge模擬泵浦停泵時管路系統暫態下的壓力分佈情形，驗證暫態下流體發生水錘效應後，對管路系統具有相當大的破壞力。此外本研究再進一步模擬安裝水錘吸收器後管路系統暫態下的壓力分佈情形，驗證透過採取有效的減緩水錘效應措施，可以減少水錘效應對系統的破壞力，避免實際撒水系統管路建置完成後發生爆管的危機。

## 陸、參考文獻

- [1] Joukowsky, N. (1900). Über den HydraulischenStoss in Wasserleitungsrohren, *Mémoires de L'Academie Impériale des Sciences de St. Pétersbourg, 8th Series, Class Physico-Mathématique, St. Petersburg(Leningrad), Ussr, Vol.9, No.5.*
- [2] Jones and Wood, (1977). An Exact Solution of the Water Hammer Problem in a Single Pipeline with Simulated Linefriction, *ASCE, 1977.*
- [3] Contractor, D.N. (1985). Two and Three Stage Valve Closure to Minimize Waterhammer



- Transients, *ASME Proceedings of the 1985 Pressure, Vessels and Piping Conference, PVP-Vol. 98-7, Fluid Structure Dynamic*, June 23-26, p357-361.
- [4] Trikha, A.K. (1975). An Efficient method for Simulating Frequency-Dependent Friction in Transient Liquid Flow, *Journal of Fluids Engineering, Trans. ASME, Vol.97, No.1*, P97-105.
- [5] Karney, B.W. and D. McInnis, (1990). Transient analysis of water distribution systems. *Journal AWWA, Vol. 82, No. 7*, pp. 62-70.
- [6] Don J. Wood, Srinivasa Lingireddy, Paul F. Boulos, (2005). *Pressure Wave Analysis of Transient Flow in Pipe Distribution Systems*, 1st Ed., Pasadena, California USA, MWH Soft, 2005.
- [7] 蕭輔洲、伍次寅 (2002)，控制管路水錘效應之最佳閥門關閉行程研究，國立臺灣大學機械工程學研究所碩士論文，台北市。
- [8] 周哲正、伍次寅 (2003)，水錘效應於具摩擦之管路中最佳閥門關閉行程研究，國立臺灣大學機械工程學研究所碩士論文，台北市。
- [9] 邱晨璋、黃美芳、徐國庭(2014)，水錘效應於具摩擦之管路中最佳閥門關閉行程研究，臺灣警察專科學校警專學報，第五卷第五期，p235-262，台北市。
- [10] Joukowsky, N. (1904). Waterhammer. *Mem Imp. Acad.Soc. St. Petersburg*, 1898(translated by O. Simin), *Proceedings AWWA*, Vol.24, pp.341-424.
- [11] Don J. Wood, Srinivasa Lingireddy, Paul F. Boulos, (2005). *Pressure Wave Analysis of Transient Flow in Pipe Distribution Systems*, 1st Ed., Pasadena, California USA, MWH Soft, pp.2-4.

