

行政院國家科學委員會補助
大專學生參與專題研究計畫研究成果報告

* ***** *
* 計 畫 *
* : 包裝材料生命週期評估研究 *
* 名 稱 *
* ***** *

執行計畫學生： 顏哲揚
學生計畫編號： NSC 98-2815-C-041-002-M
研究期間： 98年07月01日至99年02月28日止，計8個月
指導教授： 楊英賢

處理方式： 本計畫涉及專利或其他智慧財產權，1年後可公開查詢

執行單位： 嘉南藥理科技大學環境資源管理系

中華民國 99年03月31日

包裝材料生命週期評估研究

作者：嘉南藥理科技大學 環境資源管理系 顏哲揚
指導老師：嘉南藥理科技大學 環境資源管理系 楊英賢

摘要

本研究主要探討包裝材料之生命週期評估 (Life cycle assessment, LCA)，並以溫室效應和酸雨效應為環境問題範疇，探討紙類及塑膠類包裝材料使用之廢棄物，其生命週期思考(Life cycle thinking)之系統範疇包括製造階段、廢棄物運輸階段及焚化階段之環境衝擊分析，並以台灣北、中、南各三區較具代表性的縣市為個案分析。結果顯示，以一公噸廢棄物為功能單位，紙類包裝材料 2008 年之溫室效應，台北市、台中市及台南市分別為 1.1657 ton-CO₂e/year、1.1828 ton-CO₂e/year 及 1.1526 ton-CO₂e/year；塑膠包裝材料 2008 年之溫室效應分別為 3.8619 ton-CO₂e/year、4.2297ton-CO₂e/year 及 3.6972 ton-CO₂e/year。酸雨效應方面，紙類包裝材料 2008 年，台北市為 9.2611 kgSO₂-eq./ton、台中市 9.1624 kgSO₂-eq./ton 及台南市為 8.7224 kgSO₂-eq./ton；塑膠包裝材料 2008 年之酸雨效應，分別為 25.8826kgSO₂-eq./ton、33.2057kgSO₂-eq./ton 及 27.0625kgSO₂-eq./ton。

關鍵字:包裝材料、生命週期評估、溫室效應、酸雨效應

一.前言

包裝之功用除了保護食品免於環境之干擾，及保持食品品質及安全衛生。根據我國環保署資料顯示(綠色包裝設計教學規劃之探討，2004)，台灣包裝材廢棄物佔整體廢棄物 1/3，其中又以食品包裝材佔 45%為最大宗。台灣目前處理包裝材廢棄物之方式包含回收再利用、

棄置、焚化或掩埋處理，而又以焚化處理為主，然而焚化處理亦造成空氣污染、水污染戴奧辛及溫室氣體排放等二次污染問題。因此，探討如何減少廢棄物產生乃現今重要之課題之一。其可行的策略方向，可能會是如何降低包裝材料使用量，或增加環境友善性的包裝材料，將包裝材料導入綠色設計，或制訂相關法令強制改變使用限制，以減少廢棄物量或進一步提高回收處理的效率。不管從工程技術與管理著手提升，不同策略方向，重要的是過程中應以整體性的生命週期思考(Life cycle thinking)為原則，對材料選用、製造、使用及棄置之生命週期評估，作為策略評估的根據，給予重新思考，以提供減緩廢棄物相關環境問題的機會。

二.文獻回顧

目前台灣廢棄物處理的重大環境問題，其中有關包裝材料使用現狀，根據行政院環保署統計，國內一年包裝的使用量為 26,600 公噸(行政院環保署，2006)，主要原因是國人生活習慣所產生的包裝上的問題，包括過度包裝及使用不適合的包裝材料等因素。根據環保署相關資料(97 年度產品包裝綠色設計推動計畫，2008)，舉出目前我國市售產品中禮盒過度包裝情形較一般產品嚴重。基於以上原因，同時為了減少廢棄物問題，環保署的政策執行方向，乃先後設立相關回收獎勵制度(行政院環保署，2000)，提出資源回收再利用法(2002)，並鼓勵進行資源回收再利用，其最終目的乃是以源頭減廢的管理方式；而為了減少塑膠使用對環境之衝擊，先後施行「購物用塑膠袋限制使用政策」(2002)，並於 2004 年公告改制執行為「購物用塑膠袋及塑膠類(含保麗龍)免洗餐具限制使用」，並對限制對象分為「購物用塑膠袋限制使用」及「免洗餐具限制使用」(2006)；此外，環保署於 2006 年 7 月 1 號第一階段和 2007 年 7 月 1 號第二階段實施『限制產品過度包裝政策』，將過度包裝之產品限制分為：糕餅禮盒、化粧品禮盒、

酒禮盒、加工食品禮盒及電腦程式著作光碟五類，以便進行管制，未來進一步可望達到每年減少使用 6,900 公噸包裝材料，減量比率為 26 %（行政院環保署，2006），其管制方法相關施行細節，乃藉由管制指定產品之包裝空間比例、包裝層數及包裝材質之方式，以限制指定事業或製造與輸入業者對於指定產品或含指定產品之再包裝行為；而於 2007 年進一步施行「限制塑膠類托盤及包裝盒使用」，以減少塑膠類的使用，從源頭減廢的概念，減少塑膠廢棄物所衍生之環境問題，引導賣場減少塑膠類托盤、包裝盒及杯碗盤碟等一次用容器之重量，或改用塑膠以外之其他替代容器，估計實施後第一年之塑膠類一次用容器每月可減量約三十五公噸，第二年則每月可減量約五十八公噸，此法於 2010 年進行修改。上述法規的制訂與施行，無不以源頭減廢的管理方式，經由包裝材料生產者與消費使用者端給予相關限制，使包裝材料導向環境化設計及綠色消費的習慣，以降低都市廢棄物的產生。

至於在國際上的策略方向，對於包裝材料也制訂了許多相關法案及施行細則，例如：歐盟於 1994 年公告包裝材與包裝材廢棄物指令（Directive of Packaging and Packaging Waste, 94/62/EC, 簡稱 PPWD）範圍涵蓋歐盟國家之工商服務業、家用及個人消費之任何材質的包裝過程，指令並要求會員國應建立一回收體系，並鼓勵生產者提昇包裝材料的再利用、再循環及再生之應用，以減少日益增加的廢棄物問題。此外歐盟包裝物指令的管制內容，大致可以分為兩大類，即是源頭減量的預防措施及廢棄物產生後的處理方式，包括再利用、回收及再循環等。

韓國政府依據「促進資源節約及再生使用促進之相關法律」，訂定資源節約及再生使用促進之相關法律，並制訂較詳細之施行細則，如產品之包裝方法及包裝材料等基準之相關施行細則，對於各類商品使用包裝材料之包裝空間比率、包裝次數及包裝材質等皆有詳細規範

措施。以及日本在 1995 年度製定了《有關促進包裝容器分類收集及再商品化》等的法令其法規內涵包括，規範消費者的分類方式、都市及鄉村分類收集的運作和企業再生利用的回收機制，並於 2000 年 4 月起全面實施，以建構物質循環型社會。如此將文化與法規相伴提出其策略，作為減少廢棄物的管理主軸，即可顯示日本在包裝廢棄物利用回收方式的決心(日本環保省 廢棄物和再生利用政策，2004)。

綜和以上國內外眾多法規與案例，可看出全世界正朝著綠色包裝設計邁進，綠色包裝設計簡單來說便是從環境化之設計，並以生命週期思考模式，將產品導向環境化設計或綠色設計，需考量產品不同生命週期階段，以找出有利於環境改善之產品設計，例如長期經營工業用紙和瓦楞紙的綠色設計(正隆公司)，其設計主軸便是促使包裝材料單純化，以便紙類的回收並朝向可再利用化、方便攜帶化、特色化—小巧玲瓏、俱香味、可食性、復古和環保化之綠色設計包裝趨勢(主題專欄-PPW指令與綠色包裝設計；國外商品包裝四大趨勢，2005)。

對於以生命週期評估方式探討廢棄物問題及包裝材料廢棄物問題之相關文獻有，如 Chaya 等人(2007)研究以生命週期評估(Life cycle assessment, LCA)探討厭氧發酵與焚化處理垃圾之能源效益及相關環境議題之衝擊評估比較; Lee 等人(2007)，以生命週期評估法，探討食品廢棄物以不同廢棄物處理方式，評估溫室效應及相關毒性之環境衝擊議題比較；Ozeler 等人(2006)以 LCA 方法研究不同廢棄物處理方案，對環境問題的改善，除了對全球暖化衝擊議題外，顯示源頭減量是最可行的方案；Eriksson 等人(2005)，運用 LCA 方法比較焚化方式及掩埋方式對於環境衝擊之差異，其結果顯示以焚化方式處理廢棄物對於環境衝擊小於掩埋方式。此外，在垃圾回收方面，Finnveden 等人(2005)，以 LCA 方法比較不同廢棄物處理方式，並探討紙類回收及塑膠回收之情境，回收率增加則垃圾的總熱值因而降低，而溫室氣體總排放量亦隨之下降；Schmidt 等人(2007)研究，以 LCA 方法探

討垃圾之回收方式，在全球暖化方面，其環境效益明顯優於焚化及掩埋，至於對於焚化處理之優點，主要是處理一般廢棄物的問題並回收熱能進行發電，以減少石化燃料之使用；Liamsanguan 等人(2008)以 LCA 方法探討不同廢棄物處理方案對溫室氣體貢獻度之研究，顯示垃圾分類回收及掩埋合併沼氣發電之方案，對全球暖化潛勢之衝擊效應最小。

經由上述討論，以 LCA 方式探討相關技術、回收策略及材料改善，以降低廢棄物問題，基於源頭減廢及回收的概念，本研究擬探討包裝材料生命週期各階段之環境問題，特別是溫室氣體排放及酸雨議題，探討減少環境衝擊的影響的可能方向，並針對紙類及塑膠類包裝材料產生的廢棄物，選定台灣北、中、南各三區較具代表性的縣市，主要以台北市、台中市、台南市三座城市之廢棄物為 LCA 分析個案，探討包裝材料之生命週期評估，期望透過研究結果，提出對包裝材料對環境衝擊的相關分析，並進一步提出改善策略與效益分析。

三.研究方法

3.1 生命週期評估

生命週期評估方法乃源自國際標準組織(International Organization for Standardization, ISO)ISO14040 及 ISO14044 (2006)，以作為產品環境改善之評估工具，主要內容包括：(1)生命週期原理及架構(principles and framework)，(2)生命週期目的訂定(goal and scope)、系統範疇界定(boundary definition)及生命週期盤查分析(life cycle inventory)，(3)生命週期評估：包括資料歸類(classification)、特徵化(characterization)、標準化(normalization)及權重(weighting)等不同階段環境衝擊分析及(4)生命週期評估闡釋(life cycle interpretation)。

3.2 資料來源與處理

本研究之生命週期系統範疇(圖一),包括材料階段、製造階段、使用階段及回收或棄置階段,其中材料階段及製程階段之盤查資料,引用生命週期評估相關資料庫(使用 SimaPro7.0, B250 資料庫);在回收與廢棄階段,以焚化處理為主,台灣地區目前焚化爐有 24 座,本研究主要選定北、中、南各三區較具代表性的縣市,以台北市、台中市、台南市之廢棄物為 LCA 分析個案。相關盤查資料,包含廢棄物焚化處理廠相關操作參數及垃圾性質,主要為垃圾組成特性、垃圾處理量、熱值、發電量及內部用電量等,在環境盤查清單,則包括清運階段廢棄物清運車輛所耗用之柴油量,廢棄物焚化燃燒階段空氣污染清單、廢水處理資料,以及焚化發電階段之發電量。

本研究主要針對紙類和塑膠類包裝材進行生命週期評估,根據生命週期評估方法,進行溫室氣體排放及其他環境衝擊評估,相關盤查資料,經由收集及彙整,以進行生命週期評估,相關工具包含 Excel 進行相關衝擊評估之推估,並以生命週期評估軟體 SimaPro 7.0 為輔助工具,引用其相關資料庫以進行個案之生命週期評估。

至於包裝廢棄物焚化階段之溫室氣體(GHG)排放量推估,主要以二氧化碳、甲烷及氧化亞氮三類主要溫室氣體為主,參考 IPCC 之方法(2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 5, 2007) 進行推估,二氧化碳排放量之推估過程,假設廢棄物燃燒之固定碳比例為 5%,並根據質量平衡法計算二氧化碳排放量,而甲烷以及氧化亞氮則以垃圾焚化量乘以排放係數,並根據 IPCC 方法(Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007),轉換成 CO₂ 當量。其計算公式如下:

CO₂排放量(公噸)

= 垃圾焚化量(公噸) × 垃圾含碳比例(%) × 燃燒程度(95%) × CO₂重量轉換係數(44/12)

CH₄ 排放量(公噸)

$$= \text{垃圾焚化量(公噸)} \times \text{廢棄物焚化階段排放係數}(0.2) \times 10^{-6}$$

N₂O 排放量(公噸)

$$= \text{垃圾焚化量(公噸)} \times \text{廢棄物焚化階段排放係數}(50) \times 10^{-6}$$

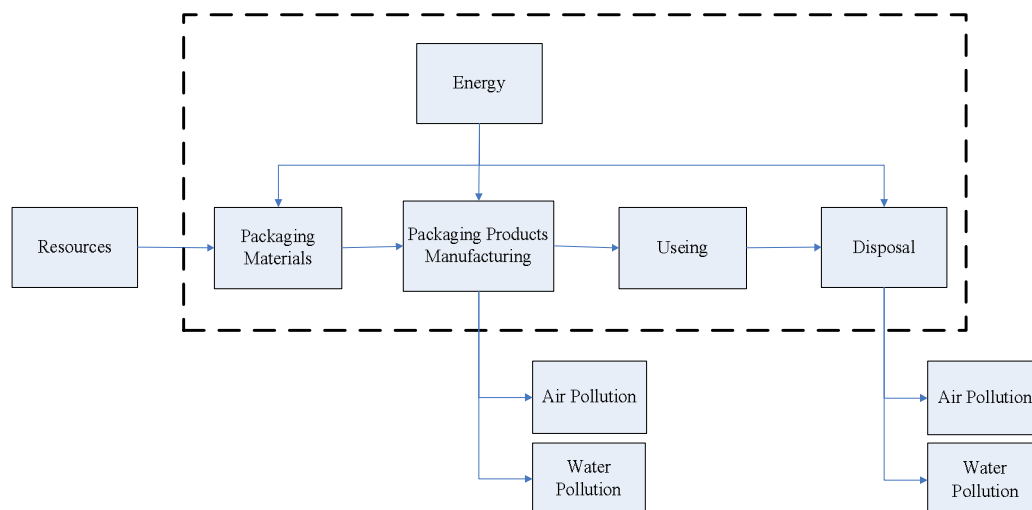


圖 1. LCA 之系統範疇

3.3 生命週期碳足跡之研究

碳足跡之概念主要架構於現有生命週期評估方法之上，主要探討產品或服務於整個生命週期階段，包含原料開採、製造、消費者使用及棄置或回收等階段之溫室氣體排放(PAS 2050, 2008)。PAS 2050:2008 為英國標準協會(BSI)、碳基金(Carbon Trust)及英國環境、食品、鄉村事務部(Defra)所共同發起之產品碳足跡標準，而世界資源研究院(World Resources Institute, WRI)及世界企業永續發展協會(World Business Council for Sustainable development, WBCSD)亦於 2009 年 11 月發布 Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard，規範產品碳足跡計算之相關標準，英國首先運用於產品的碳標籤標示，標示產品生命週期所排放的溫室氣體，以供消費者查看；日本也將其觀念運用在食品包裝上，而 Carbon Trust 已嘗試在多家企業約 75 種產品中試行 PAS 2050 標準。ISO 國際標準組織

TC207 技術為委員會預計於 2011 年公布 ISO 14067 產品碳足跡量化及溝通標準。以上說明，溫室氣體排放之控制，須於產品之設計時即納入生命週期思考，進而減少產品生命週期過程之溫室氣體排放。

四.結果與討論

4.1 現況分析

本研究以生命週期評估方法探討包裝材廢棄物之溫室效應及酸雨效應兩項環境衝擊評估，選定台北市、台中市及台南市之廢棄物為 LCA 個案分析，其中台北市之焚化廠主要為內湖、北投及木柵焚化廠，而台中市為南屯焚化廠，台南市則為城西焚化廠，台灣地區焚化廠大都為機械混燒式爐床，採 24 小時連續性焚化之操作模式，其相關之分析結果說明如下。

4.1.1 台北市焚化廠

台北市主要包含內湖、北投及木柵三座焚化廠，本研究主要針對台北市 2004~2008 年之廢棄物為 LCA 個案分析，並取三廠之平均值作為台北市廢棄物之基準值，表 1 為台北市 2004~2008 年焚化廠之操作營運資料及廢棄物相關特性，由表中顯示，台北市之年度焚化處理量由 2004 年之 223,877 公噸逐年下降至 2008 年之 198,415 公噸，期間年度平均下降比例為 2.84%，其中物理組成以紙類、廚餘及塑膠類之比例為最大，以 2004 年為例，其比例分別為 28.70%、34.59%及 15.35%。台北市紙類及塑膠類在 2004 年有最小比例與 2008 年相比有逐年增加，至於廚餘有逐年下降之趨勢，顯示台北市在近五年來垃圾的組成已經漸漸有了改變，可能原因在於廚餘類回收率已增加。

表 1. 台北市三廠焚化廠平均垃圾特性與操作分析(2004~2008)

年度	2004	2005	2006	2007	2008
焚化處理量(ton)	223,877	204,062	200,824	209,630	198,415
發電量(MWh/year)	79,671	70,651	68,189	66,899	65,355

濕基物理組成(%)					
紙類	28.70	45.73	39.57	38.62	40.92
纖維布類	4.98	3.76	3.57	5.39	5.10
木竹、稻草、落葉類	8.29	4.98	4.84	4.27	3.62
廚餘類	34.59	21.77	22.34	26.00	21.56
塑膠類	15.35	17.73	23.55	17.90	21.52
皮革類	0.85	0.24	0.79	2.79	0.91
金屬類	1.56	1.16	1.05	1.18	0.98
玻璃類	2.82	2.08	2.51	2.90	3.31
陶瓷類	0.09	0.55	0.53	0.39	0.45
石頭及 5mm 以上土砂	0.33	0.21	0.56	0.01	0.70
非鐵金屬類		0.75	0.46	0.42	0.33
其它	2.45	1.04	0.23	0.13	0.60

4.1.2 台中市焚化廠

台中市焚化廠則以南屯焚化廠為個案分析，其焚化處理量由 2004 年之 219,882 公噸上升至 2008 年之 234,406 公噸，期間年度平均上升比例為 1.54%，其中以紙類廢棄物為最大宗，以 2008 年為例，紙類廢棄物佔台中市整體廢棄物 47.60%，將近一半，以廚餘類廢棄物次之、塑膠類廢棄物為第三大宗之廢棄物；以台中市而言，紙類的比例有上升的趨勢，可能原因在於台中市的紙類回收率較低。

表 2. 台中市南屯焚化廠垃圾特性與操作分析(2004~2008)

年度	2004	2005	2006	2007	2008
焚化處理量(ton)	219,882	215,037	227,601	220,988	234,406
發電量(MWh/year)	94,291	93,899	96,836	91,682	93,591
濕基物理組成(%)					
紙類	34.26	39.85	47.80	46.14	47.60
纖維布類	4.40	3.67	2.35	3.56	1.51
木竹、稻草、落葉類	3.46	1.35	1.48	1.45	2.52
廚餘類	24.65	40.86	35.60	33.94	30.04
塑膠類	19.44	11.67	10.41	13.20	17.41
皮革類	1.56	0.08	0.09	0.07	0.05

其它可燃類	0.50	0.76	0.38	0.29	0.30
鐵金屬類	-	1.07	0.41	0.51	0.06
非鐵金屬類	-	0.22	0.08	0.05	0.01
玻璃類	9.62	0.30	0.45	0.51	0.22
其他不可燃類	1.64	0.18	0.94	0.29	0.28

1.3 台南市焚化廠

至於台南市焚化廠則以城西焚化廠為 LCA 分析之個案，其焚化處理量由 2004 年之 239,361 公噸下降至 2008 年之 204,641 公噸，期間年度平均下降比例為 3.63%，此外在於紙類和廚餘類方面皆有較大的垃圾比例，比起塑膠類而言，可能其回收方面較無效果。

表 3. 台南市城西焚化廠垃圾特性分析(2004~2008)

年度	2004	2005	2006	2007	2008
焚化處理量(ton)	239,361	220,721	204,082	205,695	204,641
發電量(MWh/year)	108,952	102,539	90,056	94,336	95,286
濕基物理組成(%)					
紙類	34.26	43.10	32.64	28.74	47.60
纖維布類	4.40	1.97	2.63	4.48	1.51
木竹、稻草、落葉類	3.46	2.15	11.26	10.16	2.52
廚餘類	24.65	36.17	19.41	25.84	30.04
塑膠類	19.44	13.81	24.69	22.60	17.41
皮革類	1.56	0.18	0.00	0.34	0.05
其它可燃類	0.50	0.72	3.50	3.81	0.30
鐵金屬類	-	0.22	0.67	0.00	0.08
非鐵金屬類	-	-	0.76	0.32	0.83
玻璃類	9.62	1.18	0.71	3.73	3.25
其他不可燃類	1.64	0.17	0.37	0.00	1.02

4.2 溫室氣體排放探討

在溫室氣體排放量探討部分，本研究以台北市、台中市及台南市之廢棄物為個案分析，主要探討紙類及塑膠類包裝材於製造、清運及焚化處理階段之溫室氣體排放，其中製造階段之溫室氣體排放係數主

要引用 SimaPro 7.0 之資料庫(表 4)；而塑膠類包裝材則針對 PVC、PS、PET 及 PE 四類，其製造階段之溫室氣體排放如表 5 所示，運用以上數據作為紙類及塑膠類包裝材製造階段之溫室氣體排放量推估依據。

表 4. 製造階段紙類包裝材之溫室氣體排放

盤查清單		
Kraftpaper bleached B250	單位	
CO ₂	0.9130	ton
N ₂ O	1.57×10 ⁻⁵	ton
CH ₄	0.0022	ton

資料來源: SimaPro7.0, Database B250

表 5. 製造階段塑膠包裝材之溫室氣體排放

盤查清單	PVC	PS(GPPS)	PET	PE	單位
	B250	B250(1998)	granulate amorph B250	granulate average B250	
CO ₂	1.94	2.60	2.20	2.20	ton
N ₂ O	6.80×10 ⁻⁶	5.20×10 ⁻⁶	5.30×10 ⁻⁶	6.00×10 ⁻⁶	ton
CH ₄	0.0022	0.0110	0.0037	0.0042	ton

資料來源: SimaPro7.0, Database B250

4.2.1 台北市包裝材廢棄物焚化處理之溫室氣體排放探討

廢棄物清運階段主要為廢棄物清運車輛所耗用之柴油，以內湖焚化廠 2006 年平均清運一公噸廢棄物耗用 33.12 公升柴油為平均值，進而推估其他年及其他廠之廢棄物清運階段之柴油使用量，以進行清運階段之溫室氣體排放。台北市 2004~2008 年廢棄物清運階段之溫室氣體排放如表 6 所示，其清運階段之溫室氣體排放隨焚化處理量逐年下降，下降比例為 11.37%。

表 6. 台北市廢棄物清運階段之溫室氣體

	2004	2005	2006	2007	2008
CO ₂ (ton/year)	20,243.34	18,451.63	18,158.84	18,955.09	17,941.04
CH ₄ (ton/year)	0.82	0.75	0.74	0.77	0.73
N ₂ O(ton/year)	0.16	0.15	0.15	0.15	0.14

GWP(tonCO ₂ e/年)	20,310.56	18,512.90	18,219.13	19,018.03	18,000.61
-----------------------------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

至於焚化階段方面，台北市 2004~2008 年紙類包裝材焚化處理之溫室氣體排放（表 7），以一公噸廢棄物為功能單位表示之溫室氣體排放潛勢，由 2004 年 0.0752 ton-CO₂e/ton 上升至 2008 年 0.1030 ton-CO₂e/ton，增加比例為 21.70%，年度平均增加比例為 6.75%，每公噸廢棄物之溫室氣體排放量上升的主要原因，可能為紙類廢棄物逐年上升，而整體廢棄物量逐年下降，因此在每公噸廢棄物中，紙類包裝材之溫室氣體排放則隨之上升。

在塑膠包裝材方面，其焚化處理量由 2004~2008 年分別為 14,612 ton、12,176 ton、15,765 ton、12,508 ton 及 14,233 ton(表 8)，塑膠包裝材焚化處理之溫室氣體排放，以一公噸廢棄物為功能單位表示，由 2004 年 0.1154ton-CO₂e/ton 略為下降至 2008 年之 0.1116 ton-CO₂e/ton，期間下降比例為 2.59%，年度平均增加比例為 0.65%。

表 7. 台北市紙類包裝材焚化階段之溫室氣體排放

單位 年度	焚化處理量	紙類包裝材焚化量	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	GWP
	ton	ton	ton/ton	ton/ton	ton/ton	ton/ton
2004	223,877	22,238	0.0737	1.99×10 ⁻⁸	4.97×10 ⁻⁶	0.0752
2005	204,062	31,698	0.0809	2.18×10 ⁻⁸	5.45×10 ⁻⁶	0.0825
2006	200,824	26,489	0.1172	3.16×10 ⁻⁸	7.89×10 ⁻⁶	0.1195
2007	209,630	26,986	0.0938	2.53×10 ⁻⁸	6.32×10 ⁻⁶	0.0957
2008	198,415	27,064	0.1010	2.72×10 ⁻⁸	6.80×10 ⁻⁶	0.1030

表 8. 台北市塑膠包裝焚化階段之溫室氣體排放

單位 年度	整體焚化處理量	塑膠包裝材焚化量	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	GWP
	ton	ton	ton/ton	ton/ton	ton/ton	ton/ton
2004	223,877	14,612	0.1145	1.31×10 ⁻⁸	3.26×10 ⁻⁶	0.1154
2005	204,062	12,176	0.1256	1.43×10 ⁻⁸	2.98×10 ⁻⁶	0.1265
2006	200,824	15,765	0.1063	1.21×10 ⁻⁸	3.93×10 ⁻⁶	0.1075
2007	209,630	12,508	0.1319	1.50×10 ⁻⁸	2.98×10 ⁻⁶	0.1328

2008	198,415	14,233	0.1106	1.26×10^{-8}	3.59×10^{-6}	0.1116
------	---------	--------	--------	-----------------------	-----------------------	--------

4.2.2 台中市包裝材廢棄物焚化處理之溫室氣體排放探討

廢棄物清運階段之溫室氣體排放主要以內湖焚化廠 2006 年平均清運一公噸廢棄物耗用 33.12 公升之柴油進行推估其 CO₂、CH₄ 及 N₂O 排放量以 2004 年度為例，分別為 19,882.16 ton/year、0.81 ton/year 及 0.16 ton/year，經由生命週期衝擊評估特徵化推估結果，溫室效應之量化當量數據為 19,948.17 ton-CO₂e/year 如表 9 所示，其溫室氣體當量有逐年下降之趨勢。

表 9. 台中市廢棄物清運階段之溫室氣體排放

	2004	2005	2006	2007	2008
CO ₂ (ton/year)	19,882.16	19,444.00	20,580.07	19,982.11	21,195.42
CH ₄ (ton/year)	0.81	0.79	0.84	0.81	0.86
N ₂ O(ton/year)	0.16	0.16	0.17	0.16	0.17
GWP(ton-CO ₂ e/年)	19,948.17	19,508.56	20,648.40	20,048.45	21,265.80

台中市紙類包裝材之焚化處理量由 2004 年之 25,111 公噸上升至 2008 年之 37,192 公噸(表 10)，其每一公噸廢棄物之溫室氣體排放由 2004 年之 0.0865 ton-CO₂e/ton 上升至 2008 年之 0.1202 ton-CO₂e/ton，上升比例為 28.03%，年度平均下降比例 7.01%，其功能單位之溫室氣體排放上升之原因，可能為紙類廢棄物逐年上升有關。

至於塑膠包裝材方面，其焚化處理量由 2004 年 14,248 公噸下降至 2006 年之 7,898 公噸而後又上升至 2008 年之 13,603 公噸，每公噸廢棄物之溫室氣體排放則由 2004 年之 0.1146 ton-CO₂e/ton 略為下降至 2008 年之 0.1026 ton-CO₂e/ton，下降比例為 10.47%，顯然台中市塑膠包材之溫室氣體量產生是為減量趨勢。

表 10. 台中市紙類包裝材焚化階段之溫室氣體排放

	焚化處理量	紙類包裝材焚化量	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	GWP
單位 年度	ton	ton	ton/ton	ton/ton	ton/ton	ton/ton
2004	219,882	25,111	0.0848	2.28×10 ⁻⁸	5.71×10 ⁻⁶	0.0865
2005	215,037	28,564	0.0986	2.66×10 ⁻⁸	6.64×10 ⁻⁶	0.1006
2006	227,601	36,264	0.1183	3.19×10 ⁻⁸	7.97×10 ⁻⁶	0.1207
2007	220,988	33,988	0.1142	3.08×10 ⁻⁸	7.69×10 ⁻⁶	0.1165
2008	234,406	37,192	0.1178	3.17×10 ⁻⁸	7.93×10 ⁻⁶	0.1202

表 11. 台中市塑膠包裝焚化階段之溫室氣體排放

	焚化處理量	塑膠包裝材焚化量	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	GWP
單位 年度	ton	ton	ton/ton	ton/ton	ton/ton	ton/ton
2004	219,882	14,248	0.1136	1.30×10 ⁻⁸	3.24×10 ⁻⁶	0.1146
2005	215,037	8,365	0.0682	7.78×10 ⁻⁹	1.95×10 ⁻⁶	0.0688
2006	227,601	7,898	0.0609	6.94×10 ⁻⁹	1.74×10 ⁻⁶	0.0614
2007	220,988	9,723	0.0772	8.80×10 ⁻⁹	2.20×10 ⁻⁶	0.0778
2008	234,406	13,603	0.1018	1.16×10 ⁻⁸	2.90×10 ⁻⁶	0.1026

4.2.3 台南市包裝材廢棄物焚化處理之溫室氣體排放探討

台南市 2004~2008 年之紙類包裝材焚化處理量由 2004 年之 27,335 公噸下降至 2008 年之 19,726 公噸，有逐年下降之趨勢，每公噸廢棄物之溫室氣體排放量由 2004 年 0.865 ton-CO₂e/ton 下降至 2008 年之 0.0730 ton-CO₂e/ton，下降比例為 27.84%，年度平均下降比例 6.96%，台南市在此期間，紙類包裝材產生之溫室氣體排放，其變化不大。

表 12. 台南市廢棄物清運階段之溫室氣體排放

	2004	2005	2006	2007	2008
CO ₂ (ton/year)	21,643.46	19,958.00	18,453.49	18,599.30	18,504.06
CH ₄ (ton/year)	0.88	0.81	0.75	0.76	0.75
N ₂ O(ton/year)	0.17	0.16	0.15	0.15	0.15
GWP(ton-CO ₂ e/年)	21,715.32	20,024.26	18,514.76	18,661.05	18,565.50

塑膠包裝材方面，其 2004~2008 年焚化處理量分別為 15,511ton、10,161 ton、16,794 ton、15,492 ton 及 15,270 ton 如表 14 所示，每公噸廢棄物之塑膠類包裝材溫室氣體排放由 2004 年 0.1146 ton-CO₂e/ton 至 2008 年 0.132 ton-CO₂e/ton，上升比例為 15.15%，年度平均下降比例 3.79%，呈現略微上升之趨勢。

表 13. 台南市紙類包裝材焚化階段之溫室氣體排放

單位 年度	焚化處理量	紙類包裝材焚化量	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	GWP
	ton	ton	ton/ton	ton/ton	ton/ton	ton/ton
2004	239,361	27,335	0.0848	2.28×10 ⁻⁸	5.71×10 ⁻⁶	0.0865
2005	220,721	31,708	0.1067	2.87×10 ⁻⁸	7.18×10 ⁻⁶	0.1088
2006	204,082	22,202	0.1067	2.87×10 ⁻⁸	7.18×10 ⁻⁶	0.1088
2007	205,695	19,702	0.0711	1.92×10 ⁻⁸	4.79×10 ⁻⁶	0.0725
2008	204,641	19,726	0.0716	1.93×10 ⁻⁸	4.82×10 ⁻⁶	0.0730

表 14. 台南市塑膠包裝焚化階段之溫室氣體排放

單位 年度	焚化處理量	塑膠包裝材焚化量	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	GWP
	ton	ton	ton/ton	ton/ton	ton/ton	ton/ton
2004	239,361	15,511	0.1136	1.30×10 ⁻⁸	3.24×10 ⁻⁶	0.1146
2005	220,721	10,161	0.0807	9.21×10 ⁻⁹	2.30×10 ⁻⁶	0.0814
2006	204,082	16,794	0.1136	1.30×10 ⁻⁸	3.24×10 ⁻⁶	0.1146
2007	205,695	15,492	0.1321	1.51×10 ⁻⁸	3.77×10 ⁻⁶	0.1332
2008	204,641	15,270	0.1309	1.49×10 ⁻⁸	3.73×10 ⁻⁶	0.1320

4.2.4 綜合比較

綜合以上台北市、台中市及台南市紙類及塑膠類包裝材廢棄物量，本研究可獲得以下結果：

以紙類包裝廢棄物而言(圖 2)，台中市有逐年增加之趨勢，並且為三縣市最高，相對來說台南市有逐年下降之趨勢，而台北市相較於其他兩縣市來說較為平穩，其原因可能在於台北市之紙類物理組成除 2004 年外均都無較大之變化(表 1)。

以塑膠包裝廢棄物來說，如圖 3 所示，台南市反而較其他三縣市為高，其原因可能為台南市有相較於台北市和台中市較高的塑膠物理組成，但有逐年下降之趨勢；台中市則最低但卻有逐年增加之趨勢；而台北市依舊相較於其他兩縣市來說較為平穩，其原因一樣在於相較於其他兩縣市而言，台北市的塑膠物理組成並無太大之變化。

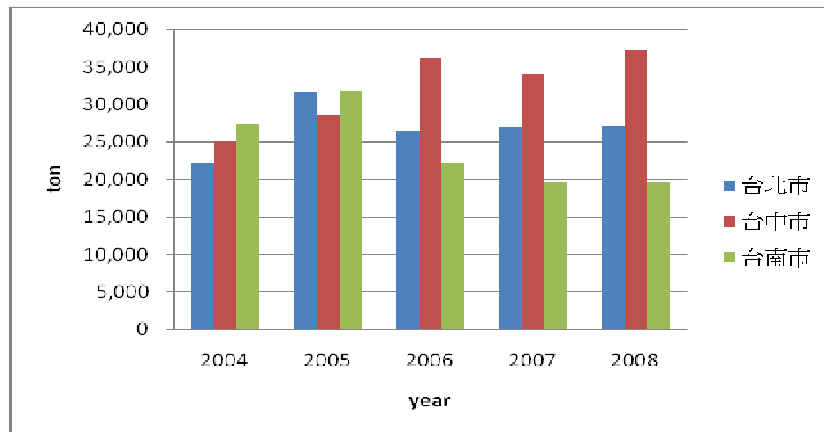


圖 2. 三縣市之紙類包裝廢棄物之比較

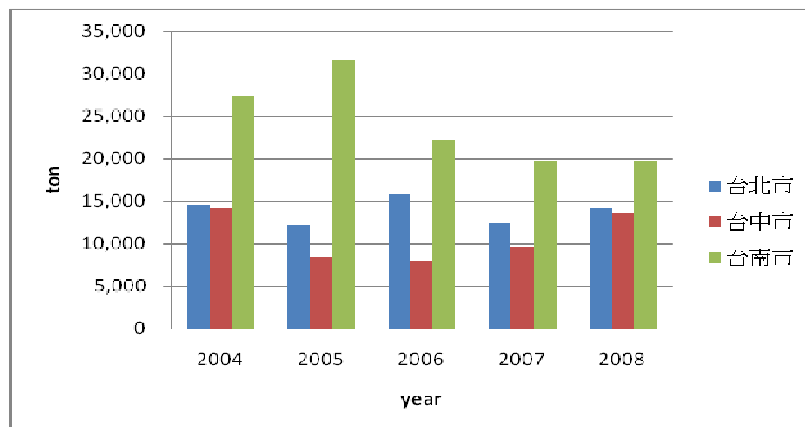


圖 3. 三縣市之塑膠包裝廢棄物之比較

溫室氣體之 LCA 比較將三縣市之製造階段、廢棄物清運階段及焚化階段之溫室氣體排放加總得到以下結果：

以紙類包裝材而言，本研究在製造階段使用了 SimaPro7.0 的資料庫(表 4)，在廢棄物清運階段則使用了經濟部溫室氣體盤查工具(3.0 版)進行溫室氣體排放之推估，包含 CO₂、CH₄、N₂O 三類主要溫室氣體，在焚化階段則運用 IPCC 方法進行計算並轉換為 CO₂ 當量，本研究之功能單位為焚化處理一公噸廢棄物，其結果如表 15 及圖 4 所示，

台中市相較於台北市和台南市都較為高，並在 2006 年得到了最高的當量 1.1833 ton-CO₂e/year，台北市和台南市都於 2006 年有較高之當量，其原因可能在於台中市於 2004~2008 年都有較高之紙類包裝廢棄物，若以五年平均而言，台北市、台中市及台南市分別為 1.1578 ton-CO₂e/year、1.1715 ton-CO₂e/year 及 1.1526 ton-CO₂e/year，是台中市為最高，台北市次之，台南市最低。

至於塑膠包裝材方面，以環保署公布之資料來得到 PVC、PS、PET 以及 PE 四類塑膠材之比例(一般廢棄物垃圾組成採樣及分析工作委託專案計畫，2008)同樣以焚化處理一公噸廢棄物為功能單位，其結果如表 16 和圖 5 所示，台北市於 2004 年 4.3866 ton-CO₂e/year 較為其他兩縣市高，三縣市比較差異不大，若以五年平均則以台北市為最高 3.1961 ton-CO₂e/year，台中市和台南市分別為 3.0689 tonCO₂e/year 和 3.0038 ton-CO₂e/year，其可能原因為台北市在 2004 年度 PVC、PS、PET 以及 PE 這四個部分，其回收比台中市和台南市為高。

表 15. 三縣市紙類包裝材 LCA 之 GWP 比較

	台北市	台中市	台南市	單位
2004	1.1379	1.1491	1.1491	ton-CO ₂ e/year
2005	1.1452	1.1632	1.1714	ton-CO ₂ e/year
2006	1.1822	1.1833	1.1714	ton-CO ₂ e/year
2007	1.1583	1.1791	1.1352	ton-CO ₂ e/year
2008	1.1657	1.1828	1.1356	ton-CO ₂ e/year
Average	1.1578	1.1715	1.1526	ton-CO ₂ e/year

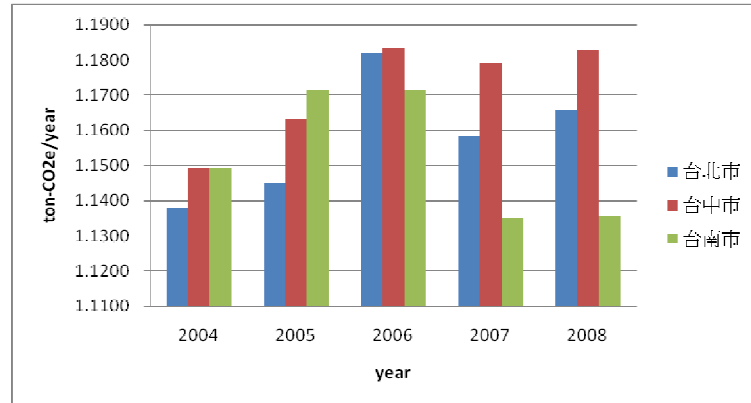


圖 4. 三縣市紙類包裝材 LCA 之 GWP 比較圖

表 16. 三縣市塑膠包裝材 LCA 之 GWP 比較

	台北市	台中市	台南市	單位
2004	4.3866	2.1129	2.8024	ton-CO ₂ e/year
2005	2.0091	3.3212	3.6267	ton-CO ₂ e/year
2006	2.4988	3.3045	2.7795	ton-CO ₂ e/year
2007	3.2239	2.3946	2.1143	ton-CO ₂ e/year
2008	3.8619	4.2297	3.6972	ton-CO ₂ e/year
Average	3.1961	3.0726	3.0043	ton-CO ₂ e/year

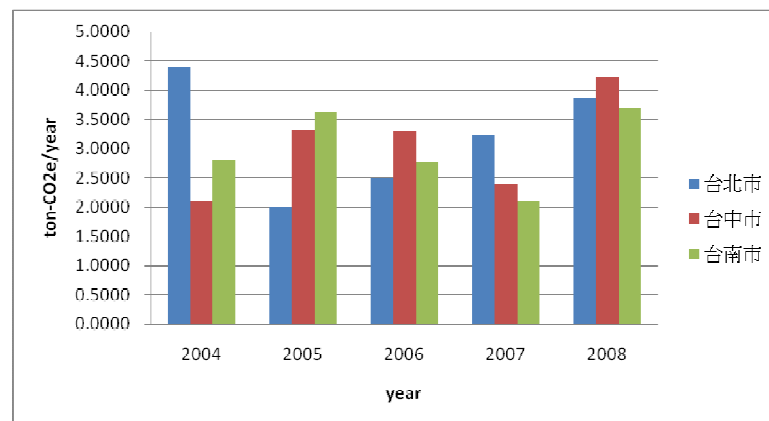


圖 5. 三縣市塑膠包裝材 LCA 之 GWP 比較圖

4.3 碳足跡比較

所謂碳足跡乃是考量了京都議定書所規範的六種溫室氣體，並將其轉換成 CO₂ 當量，而京都議定書所規範的溫室氣體有 CO₂、CH₄、N₂O、HFC_s、PFC_s 及 SF₆ 這六種，但本研究只探討於溫室氣體 CO₂、CH₄ 及 N₂O 三類之排放量，故本研究之碳足跡之比較可以參考於綜合

比較這部分，並進而得知紙類包裝材和塑膠包裝材之碳足跡有多少，更可以知道台北市、台中市及台南市這三縣市之碳足跡哪個較為高，未來本研究將更做出完整之碳足跡研究。

4.4 酸雨比較

酸雨效應部分，以 Eco-indicator 95 方法之特徵化因子推估酸雨潛勢效應值。以台北市紙類包裝材為例，生命週期不同階段之酸雨潛勢貢獻在製造(如表 17)、清運及焚化階段之貢獻分別為 78.16%、10.21%及 11.63%，顯示酸雨潛勢來源主要來自製造階段。經由特徵化將 NO_x、SO_x 及 HCL 轉化為酸雨潛勢(SO₂-eq.)，其結果顯示如表 19 及圖 6，其中以台中市 2005 年酸雨效應為最大，為 9.3365 kgSO₂-eq./ton，因在製造階段三縣市之酸雨潛勢差異不大，所以可能原因為在 2005 年度台中市焚化過程造成之酸雨衝擊較大。以五年平均來看，台北市、台中市及台南市分別為 9.1422 kgSO₂-eq./ton、9.2418 kgSO₂-eq./ton 及 8.6472 kgSO₂-eq./ton，因此造成之酸雨衝擊台中市為最大，台北市次之，台南市最低。

以台北市塑膠包裝材為例，生命週期不同階段之酸雨潛勢貢獻在製造(表 18)、清運及焚化階段之貢獻分別為 91.11%、4.06%及 4.84%，顯示酸雨潛勢來源主要來自製造階段。經由特徵化將 NO_x、SO_x 及 HCL 轉化為酸雨潛勢(SO₂-eq.)，其結果顯示如表 20 及圖 7，其中以台北市 2004 年酸雨效應為最大，為 45.7928 kgSO₂-eq./ton，其原因可能為製造階段 PVC、PS、PET 以及 PE 這四個部分相較於台中市和台南市有較高比例的關係。若以五年平均比較，台北市、台中市及台南市分別為 26.17 kgSO₂-eq./ton、24.47 kgSO₂-eq./ton 及 21.94 kgSO₂-eq./ton，因此造成之酸雨衝擊台北市為最大，台中市次之，台南市最低。

表 17. 製造階段紙類包裝材之酸雨效應

名稱	
Kraftpaper bleached B250	
NOx(kg)	4.75
SOx(kg)	3.78
HCL(kg)	0.0423

資料來源:Simapro7.0, Database B250

表 18. 製造階段塑膠包裝材之酸雨效應

	PVC B250	PS(GPPS) B250(1998)	PET granulate amorph B250	PE granulate average B250
NOx(kg)	16.00	12.00	19.00	11.00
SOx(kg)	13.00	11.00	22.00	7.00
HCL(kg)	0.23	0.03	0.10	0.06

資料來源:Simapro7.0, Database B250

表 19. 三縣市紙類包裝材酸雨效應比較

	台北市	台中市	台南市	單位
2004	8.7688	9.1710	8.6576	kgSO ₂ -eq./ton
2005	9.2283	9.3365	8.6738	kgSO ₂ -eq./ton
2006	9.2551	9.2792	8.6083	kgSO ₂ -eq./ton
2007	9.1977	9.2599	8.5741	kgSO ₂ -eq./ton
2008	9.2611	9.1624	8.7224	kgSO ₂ -eq./ton
Average	9.1422	9.2418	8.6472	kgSO ₂ -eq./ton

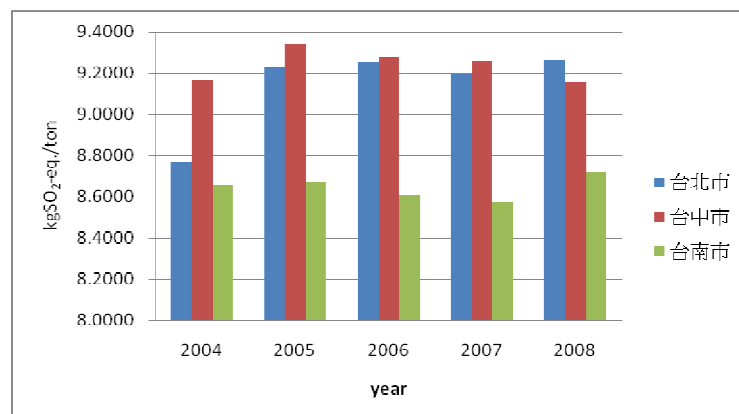


圖 6. 三縣市紙類包裝材酸雨效應比較圖

表 20. 三縣市塑膠包裝材酸雨效應比較

	台北市	台中市	台南市	單位
2004	45.7928	14.4226	21.1361	kgSO ₂ -eq./ton
2005	15.8557	26.6630	28.2199	kgSO ₂ -eq./ton
2006	19.0943	23.7361	18.6242	kgSO ₂ -eq./ton
2007	24.2087	24.3176	14.6394	kgSO ₂ -eq./ton
2008	25.8826	33.2057	27.0625	kgSO ₂ -eq./ton
Average	26.1668	24.4690	21.9364	kgSO ₂ -eq./ton

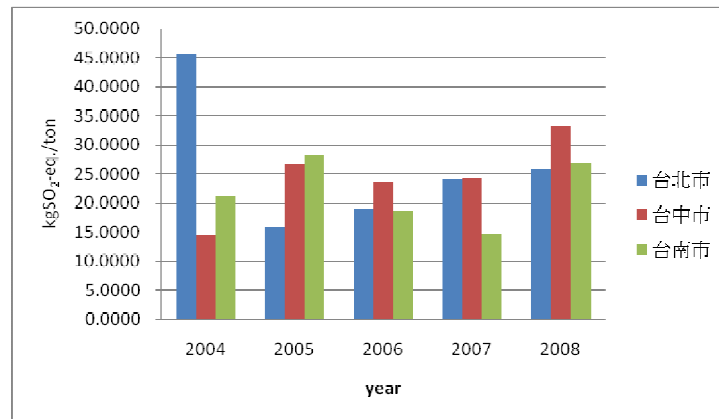


圖 7. 三縣市塑膠包裝材酸雨效應比較圖

五. 結論與建議

本研究探討紙類包裝材和塑膠包裝材之生命週期評估，並考量溫室效應與酸雨效應，個案廢棄物階段以台北市、台中市及台南市研究對象，做以下結論與建議：

1. 生命週期評估結果，溫室效應及酸雨效應之來源主要來自製造階段與焚化階段。
2. 紙類包裝廢棄物以台中市有較高的比例，可建議減少紙類包裝材的使用。
3. 塑膠包裝材廢棄物以台南市產生量較高，其中溫室效應結果以台北市及台中市為較高，在 2008 年台北市、台中市及台中市之溫室效應分別為 3.8619 ton-CO₂e/year、4.2297 ton-CO₂e/year 及 3.6972 ton-CO₂e/year，其中台南市為最低。主要的生命週期排放，台北市和台中市結果在製造階段排放了較多的溫室氣體。

4. 從生命週期之酸雨潛勢，紙類包裝材以台北市及台中市為最高，除了考量製造階段的減量，並建議增加廢棄物的回收。
5. 塑膠包裝材之酸雨效應，台北市、台中市及台南市分別為 26.17 kgSO₂-eq./ton、24.47 kgSO₂-eq./ton 及 21.94 kgSO₂-eq./ton，以台北市為最大。
6. 本研究採用生命週期評估探討紙類包裝材料及塑膠包裝材料之溫室效應及酸雨效應分析，未來可進一步延伸其他環境衝擊，並增加資料完整性，將使生命週期評估更加完善。

六.參考文獻

1. Wiedmann T. and Minx J., (2007) “A Definition of 'Carbon Footprint'”, Research & Consulting.
2. Siracusa V. , Rocculi P., Romani S. and Rosa M. D. , (2008) “Biodegradable polymers for food packaging: a review”, “Trends in Food Science & Technology”, 19, p634-643.
3. Zhao W., Voet E. v. d., Zhang Y., Huppel G. , (2009) “Life cycle assessment of municipal solid waste management with regard to greenhouse gas emissions: Case study of Tianjin, China”, Science of the Total Environment 407 , 407, p1517-1526.
4. Lenzen M., Murray J., Sack F., Wiedmann T., (2007) “Shared producer and consumer responsibility — Theory and practice”, Science Direct, 61, p27-42.
5. Takeda S. , (2007) “The double dividend from carbon regulations in Japan”, J. Japanese Int. Economies 21, p336-364.
6. Hayami H., Nakamura M., (2007) “Greenhouse gas emissions in Canada and Japan: Sector-specific estimates and managerial and economic implications”, Journal of Environmental Management, 85, p371-392.
7. Dixon-Hardy D. W., Curran B. A., (2009) “Types of packaging waste from secondary sources (supermarkets) – The situation in the UK”, Waste Management, 29, p1198-1207.
8. Roy P., Nei D., Orikasa T., Xu Q., Okadome H., Nakamura N., Shiina T. , (2009) “A review of life cycle assessment (LCA) on some food products”, Journal of Food Engineering, 90, p1-10.

9. Lilja R. , (2009) “Negotiated environmental agreements in promoting material efficiency in industry – first steps in Finland”, *Journal of Cleaner Production*, p1-10.
10. Chaya, W., Gheewala, S. H., (2007)“Life cycle assessment of MSW-to-energy schemes in Thailand”, *Journal of Cleaner Production*, 15, pp.1463-1468.
11. Lee, S., Choi, K., Osako, M., Dong, J., (2007) “Evaluation of environmental burdens caused by changes of food waste management systems in Seoul, Korea”, *Science of the Total Environment*, 387, pp.42-53.
12. Özeler, D., Yetis, Ü., Demirer, G. N., (2006)“Life cycle assessment of municipal solid waste management methods: Ankara case study”, *Environmental International* 32, pp.405-411.
13. Eriksson, O., Carlsson, Reich, M., Frostell, B., Bjorklund, A., Assefa, G., Sundqvist, J.O., Granath, J., Baky, A., Thyselius, L., (2005) “Municipal solid waste management from a systems perspective”, *Journal of Cleaner Production*, 13, pp.241-252.
14. Finnveden, G., Johansson, J., Lind, P., Moberg, Å., (2005)“Life cycle assessment of energy from solid waste-part 1: general methodology and results,” *Journal of Cleaner Production*, 13, pp.213-229.
15. Schmidt, J. H., Holm, P., Merrild, A., Christensen, P., (2007) “Life cycle assessment of the waste hierarchy - A Danish case study on waste paper”, *Waste Management*, 27, pp.1519-1530.
16. Liamsanguan, C., Gheewala, S.H., (2008) “The holistic impact of integrated solid waste management on greenhouse gas emissions in Phuket”, *Journal of Cleaner Production*, 16, pp.1865-1871.
17. British Standard, Carbon Trust and defra, (2008), “PAS 2050:2008”.
World Resources Institute and World Business Council for Sustainable development, (2009), “Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard”.
18. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 5, 2007.
19. 行政院環保署，限制產品過度包裝政策，2006，<http://www.epa.gov.tw/>。
20. 行政院環保署，環境品質資料倉儲，2009，<http://edw.epa.gov.tw/>
21. 張國財，鄭少谷，黃文輝，林宏端，顏鳳旗，“包裝環境化設計案例”。

22. 張國財,“環保包裝材介紹”,2003,永續產業發展雙週刊。
23. 吳贊鐸,蔡馥羽,張彥文,江福建,周麗琴,廖文蘭,林忠逸,“綠色產品設計與績效評估模式建立之研究”。
24. 林建宏,陳靖原,吳志庭,羅鈞璋,康昭璋,2003,“限制過度包裝最適化管制策略計畫”。
25. 英國環境署,2007,“英國包裝廢棄物法規最新執行狀況”。
26. 楊美維,2008,“綠色包裝設計”。
27. 行政院環保署,一般廢棄物垃圾組成採樣及分析工作委託專案計畫,2008。
28. 呂哲璋,楊英賢,方俊琪,顏哲揚,2010,探討廢棄物含水率擾動之溫室氣體排放研究-以台北市垃圾為例,2010 永續性產品與產業管理研討會,雲林,雲林科技大學,民國九十九年三月十九日。
29. 呂哲璋,楊英賢,顏哲揚,2009,垃圾回收率對焚化爐發電之生命週期評估與不確定分析,2009 永續性產品與產業管理研討會,台南,民國九十八年三月二十一日。
30. 呂哲璋,楊英賢,顏哲揚,2008,以生命週期評估擾動分析方法應用於垃圾回收之能源及二氧化碳排放探討,2008 廢棄物處理研討會,國立台灣大學,台北,民國九十七年十一月八日。