

電弧爐工廠附近空氣污染與學童肺功能檢測之關係研究

許惠悰^{1*}、黃彬芳²、張雅琪³、蕭雅文⁴

¹中國醫藥大學健康風險管理學系 副教授

²中國醫藥大學職業安全與衛生學系 教授

³中國醫藥大學健康風險管理學系系 學士生

⁴中興大學環境工程研究所 碩士

*通訊作者, Tel: 04-2205-3366 轉 6502, E-mail : hthsu@mail.cmu.edu.tw

摘要

本研究搭配空氣採樣與人體肺功能檢測，以觀察電弧爐煉鋼廠周邊之空氣污染情形，及其對人體健康的影響。結果顯示，懸浮微粒的濃度雖然並未有明顯高於對照組的濃度。但是，細懸浮微粒中五種金屬元素的濃度包括Cd、Cr、Cu、Ni、Zn則有隨著距離排放源越近而濃度愈高的現象，且濃度已達統計上差異顯著的水準。肺功能的檢測發現，男學童之用力吸氣再將氣吐光為止的吐氣量有隨著距離電弧爐工廠越近，其表現有越差的趨勢。經身高與體重校正肺功能，我們發現男學童方面， Δ FVC有隨者距離電弧爐鋼鐵廠越近，而呈現負值越大的現象。電弧爐工廠盛行風下風處的兩個採樣點之 Δ FVC值均小於0，相對的遠離電弧爐工廠的C點之 Δ FVC值則大於0，且此差異已達統計上顯著差異的水準。再以 Δ FVC值小於0的百分比來觀察，很明顯的可以發現，距離電弧爐工越近， Δ FVC值小於0的百分比呈現越高的現象。最後，以迴歸分析的方法探討PM_{2.5}中五種金屬的濃度對於肺功能改變量的影響性，結果顯示，男學童 Δ FVC改變量大小之影響性依序為Cr、Cd、Ni、Cu、Zn，此與文獻中之動物細胞體外研究有一致的趨勢。

關鍵字：電弧爐，肺功能，有毒金屬，細懸浮微粒，FVC

一、前言

電弧爐(Electric Arc Furnace, EAF)煉鋼是台灣鋼鐵產業重要的製程，每年粗鋼的總產能中約有一半左右是透過電弧爐的製程生產而來。在煉鋼的過程因電弧產生的高溫促使鋼液沸騰，造成鋼液中的有毒元素揮發並與氣流中的氧反應形成氧化物，最後凝結沉積產生細微之粉塵。相關的研究指出，其粉塵包括Fe、Zn、Ni、Pb、Cd、As及Cr等毒性元素[1,2]，而當空氣污染處理不妥善時，含有害金屬物質成份的懸浮微粒(Particulate Matter, PM)即可透過煙道排放至周界，造成空氣污染和人體健康危害等問題。

相關的研究指出，PM₁₀和PM_{2.5}會增加氣喘的呼吸道症狀，以及降低人體肺功能(Pulmonary Function)的

表現[3]。此外，空氣污染物的慢性效應，在經由長期追蹤世代研究後發現，暴露到的空氣污染物濃度上升會對兒童肺功能發展有顯著負面的影響 [4,5]。

由於文獻中對於電弧爐製程所產生之懸浮微粒對其周邊之空氣污染情形的探討非常的有限，且對於這些懸浮微粒中之有害金屬成分造成人體健康之影響情形亦非常的不足，特別是針對敏感性族群的呼吸系統的健康風險問題，是極有必要做深入的探討與研究。所以我們特別針對中部某一大型電弧爐煉鋼廠，在其鄰近周邊選擇了三所國小，其中A、B兩所國小所在之位置距離電弧爐鋼鐵廠較近且為盛行風的下風處、C國小則距離電弧爐鋼鐵廠較遠且為盛行風的上風處，進行空氣品質的監測，主要針對PM濃度(PM₁₀及PM_{2.5})

以及分析PM中9種金屬成分(Al, As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn)的濃度；同時，我們亦在此三所國小進行學童的肺功能檢測，然後根據空氣品質及肺功能檢測之結果進行比較分析，探討是否距離電弧爐工廠較近之國小學童其肺功能會較距離較遠之國小學童差，並且瞭解肺功能的表現與懸浮微粒中金屬成分的相關性及影響。

二、研究方法

2.1 採樣點

本研究共設置三個空氣品質採樣測站，分別以A、B和C表示(如圖1)，A採樣點的位置位於近電弧爐煉鋼廠污染源的東南方約0.5 km處，B採樣點的位置則為污染源的西南方約1 km處，而在B採樣點西南方位置約2.05 km處有一座焚化爐，而C採樣點位於污染源東北方約4.2 km處，附近主要以農田為主，其北方約0.39 km處有大安溪流，因本研究C採樣點屬於離電弧爐煉鋼廠較遠，較不受到電弧爐煉鋼廠排放的影響，因此可作為與近污染源地比較的對照測站，將其與近污染源地區的採樣結果(A、B採樣點)作比對。

2.2 懸浮微粒採樣方法

本研究於2010年的11月及2011年的2月及7月分別在三個採樣點進行PM_{2.5}及PM_{2.5-10}的採樣。採樣的方法是利用雙粒徑高量採樣(Model TE-6000 PM₁₀)並加裝細粒徑採樣衝擊板(Series 230 High Volume Cascade Impactor Model TE-231 PM_{2.5}, Tisch Environment)，搭配利用石英濾紙(Pallflex 出產，型號55356, QTY.25)分別採集細粒PM_{2.5}和粗粒PM_{2.5-10}的大氣懸浮微粒。採樣中，以1.13 m³ min⁻¹之流量抽引大氣中之懸浮微粒進入採樣器內，藉由衝擊板分成粗粒與細粒。每次採樣的時間為24小時，如此連續採樣3天，每個採樣點共取得9個樣本。

濾紙在採樣前後均以調理箱內調理24小時以上，秤重時的條件，溫度在23±3°C，濕度則為45±5%的範圍內進行。如此以求取大氣懸浮微粒PM_{2.5}及PM_{2.5-10}之質量濃度。



圖 1. 本研究空氣品質及肺功能採樣點位置圖

2.3 大氣懸浮微粒元素分析方法

本研究利用微波消化的方式將濾紙採集到的PM樣本，以10 ml 5.55%的HNO₃加上10 ml 16.75%的HCl進行消化。消化完成後，待冷卻後，加入去離子水至體積為50 ml。然後利用Perkin Elmer公司之型號Elan 6100之感應耦合電漿質譜儀(Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry, ICP-MS)進行微粒中金屬元素的濃度分析。

2.4 學童肺功能檢測

本研究利用MIR MiniSpiro PC-based Spirometer肺功能量計來測量參與此項研究學童之肺功能。研究過程中，我們先取得中國醫藥大學醫學倫理委員會的同意，始進行相關之研究。我們分別在2011年的1月至參與研究的三所國小舉辦說明會，取得家長的同意函，並填寫暴露情形的問卷資料，然後再進行肺功能的檢測。肺功能的檢測完全依照美國胸腔協會(American Thoracic Society, ATS)建議的準則；測量肺功能時，受試者站立並且戴上鼻夾，獲得至少三次可再現的用力呼氣流量曲線[6]。另外，受試者必須排除六個禮拜內曾經有肺部感染的疾病，例如流行性感冒患者。

三、結果與討論

3.1 大氣懸浮微粒採樣結果

圖2為本研究在夏冬兩季三個採樣點之採樣結果之比較。從圖中可以看出A、B、C三個採樣點在

夏季之採樣的平均 PM₁₀ 的濃度分別為 47.0、45.3、和 42.7 μg/m³；而冬季期間之 PM₁₀ 的平均濃度則分別為 81.8、80.0、及 77.8 μg/m³。相對的，三個採樣點在夏季之採樣的平均 PM_{2.5} 的濃度分別為 31.0、30.7、和 29.3 μg/m³；而冬季期間之 PM_{2.5} 的平均濃度則分別為 52.8、53.3、及 51.7 μg/m³。雖然，監測的結果顯示電弧爐近距離的測站(A 與 B 點)所採集的 PM₁₀ 與 PM_{2.5} 之濃度有較遠距離測站(C 點)為高，但是經過 ANOVA 的檢定，三個測站在兩季之濃度的差異並未達統計顯著差異的水準。PM₁₀ 之檢定結果夏冬兩季之 p 值分別為 0.828 及 0.905；而 PM_{2.5} 之檢定結果夏冬兩季之 p 值則分別為 0.945 及 0.948。

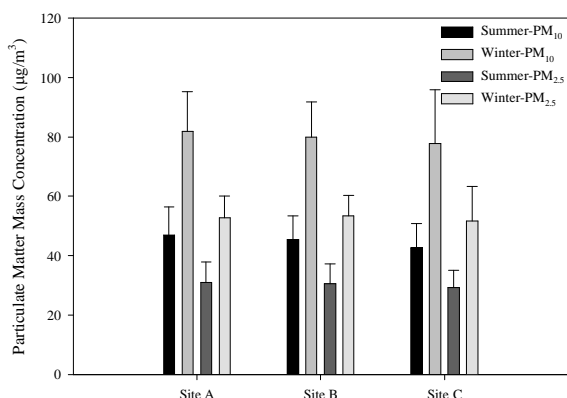


圖 2. 三個採樣點之夏冬兩季之 PM 的濃度比較

本研究在台灣中部的電弧爐工廠附近所測得之 PM_{2.5}/PM₁₀ 的比值，夏季之平均值為 0.66，而冬季之比值則在 0.65 左右，顯示，在此地區所測得之 PM_{2.5}/PM₁₀ 的比值相當穩定，並無隨著季節的變化而改變。與南韓的工業城釜山(Ulsan)比較[7]，本研究之 PM_{2.5} 占 PM₁₀ 之比例顯然有高於該工業區的現象。然與其他大城市之採樣結果比較，例如南韓的首爾(Seoul)[8]、西班牙的馬德里(Madrid)[9]、及土耳其的伊茲密爾(Izmir)[10]，則本研究在台灣之中部的中型都會區之電弧爐工廠周邊之採樣結果，PM_{2.5} 占 PM₁₀ 之比例，有稍低於都會區以交通排放源為主的趨勢。

3.2 細懸浮微粒中金屬元素分析

相關的研究指出，懸浮微粒影響人體健康的因子包括微粒之質量、粒徑大小的分布、微粒之成份等

[11]。而微粒的成份中，金屬的成份被視為重要影響呼吸系統之發炎反應之重要影響因子[12]。因此，我們特別針對細懸浮微粒(PM_{2.5})中之九種有毒金屬成分進行分析，以瞭解在電弧爐工廠周邊近距離採樣點所採集之細懸浮微粒中與遠距離點之間之差異性。

表 1. 三個採樣點 PM_{2.5} 中九種有毒金屬成分分析結果

元素	Site A	Site B	Site C	p-值
PM_{2.5}				
Al	75.3±21.0	68.2±30.2	54.8±15.4	0.11
As	2.6±2.6	1.9±1.9	2.0±2.0	0.32
Cd	1.4±1.4	0.7±0.7	0.5±0.5	0.05
Cr	2.2±0.9	1.8±0.5	1.2±0.2	<0.001
Cu	21.4±12.1	19.7±14.4	8.5±3.7	0.02
Hg	0.2±0.1	0.2±0.2	0.1±0.0	0.06
Ni	6.8±6.6	3.5±1.3	2.4±1.2	0.02
Pb	105.5±102.7	120.6±130.0	41.0±61.2	0.09
Zn	302.7±195	221.8±201.3	55.8±24.7	0.002

單位：ng/m³

表 1 為本研究中三個採樣點之 PM_{2.5} 中九種有毒金屬之濃度分析結果。可以發現，距離電弧爐鋼鐵廠最近的採樣點 A 之金屬濃度均有最高的現象。特別是 Cd、Cr、Cu、Ni、Zn 等五種金屬元素之濃度，經 ANOVA 檢定，顯示其 p-值小於 0.05，亦即在統計上達差異顯著之水準。顯示，這五種元素之濃度與電弧爐鋼鐵廠間有顯著的相關。盛行風的下風處之 A 與 B 點，顯著高於上風處遠距離之 C 點，且有隨著距離電弧爐工廠越近，濃度有越高的趨勢。

3.3 肺功能分析結果

本研究除了在電弧爐工廠的鄰近周邊設置三個懸浮微粒的採樣站(三所國小)外，亦同時在此三個採樣站邀請了該校的六年級小朋友參與本研究之執行。總共有 215 位小朋友願意配合執行肺功能的檢測。

表 2 為三個採樣點之男、女學童之檢測結果。表中顯示，男學童之用力吸氣再將氣吐光為止的吐氣量(FVC)有隨著距離電弧爐工廠越近，其表現有越不佳

的趨勢，距離最近電弧爐工廠的 A 點，平均 FVC 為 2.45L，而距離最遠的 C 點，平均 FVC 為 2.81L，下風處之另一採樣點(B 點)，則介於兩者中間為 2.60L。此差異經 ANOVA 檢定($\alpha=0.05$)，已達統計上差異顯著的水準。顯示，距離電弧爐工廠越近的 A 校，FVC 有明顯表現最差的情形，相對的上風處且遠離電弧爐工廠的 C 校，男學童的 FVC 表現則明顯最佳。FEV₁ 雖然亦有此趨勢，然未達統計上差異顯著的水準。另外，三個地區之女學童的各項肺功能表現並未有顯著性的差異。不過，沒有差異並不表示女學童的肺功沒有受到影響，值得後續進一步的分析。

表 2. 三個採樣點之學童肺功能檢測結果

肺功能	Site A	Site B	Site C	p-值
男學童				
FVC	2.45±0.39	2.60±0.44	2.81±0.36	0.017
FEV ₁	2.22±0.34	2.34±0.39	2.46±0.29	0.078
FVC/FEV ₁	0.91±0.06	0.90±0.06	0.88±0.07	0.289
女學童				
FVC	2.42±0.36	2.41±0.42	2.40±0.34	0.972
FEV ₁	2.25±0.34	2.22±0.36	2.23±0.27	0.942
FVC/FEV ₁	0.93±0.05	0.93±0.04	0.93±0.08	0.880

3.4 肺功能與 PM_{2.5} 中金屬元素之關係

動物的實驗研究證實，實驗動物的肺部發炎反應與金屬的成分有關[13,14,15]。因此，本研究利用三個測站之 PM_{2.5} 中金屬的濃度及其所在學童之肺功能進行分析，以比較不同金屬之間的影响性。三個國小測站之 PM_{2.5} 中金屬濃度僅 Cd、Cr、Cu、Ni、和 Zn 在統計上呈現顯著差異的情形。因此，我們乃分析以此五種金屬元素，然後與三個學校之 Δ FVC 進行迴歸分析，以評估 PM_{2.5} 中金屬元素濃度改變一個單位， Δ FVC 的改變量之大小。其公式為：

$$\Delta FVC = b_0 + b_1 \times [PM_{2.5}]_i$$

其中， $\Delta FVC = FVC_{(實測值)} - FVC_{(預測值)}$ ， b_0 和 b_1 為常數， $[PM_{2.5}]_i$ 為 PM_{2.5} 中金屬元素濃度， i 為 Cd、Cr、Cu、Ni、Zn。

表 3 為迴歸分析之結果。此表中， b_1 的值表示各別元素對於 Δ FVC 之影響性大小，其值越大表示影響

性越大。表中顯示，男學童 Δ FVC 改變量大小之影響性依序為 Cr、Cd、Ni、Cu、Zn。

Takano 等人[16]利用動物細胞體外實驗的方法，分析不同濃度的金屬(Cd、Hg、Mn、Ni、Pb)造成肺泡細胞失去活性的細胞毒性大小，結果顯示，毒性最大的為 Cd 與 Hg，毒性為中等者包括 Ni 和 Pb，Mn 則幾乎沒有任何的毒性效應。我們的結果與該論文之排序有相同的趨勢。

表 3. PM_{2.5} 中 Cd、Cr、Cu、Ni、Zn 濃度與肺功能 Δ FVC 之迴歸分析

元素	b_0	b_1	R ²
男學童			
Cd	0.280	-0.287	0.543
Cr	0.634	-0.348	0.902
Cu	0.465	-0.026	0.999
Ni	0.289	-0.060	0.572
Zn	0.306	-0.001	0.946

四、結論

本研究搭配空氣採樣與人體肺功能檢測，以觀察電弧爐煉鋼廠周邊之空氣污染情形，及其對人體健康的影響。結果顯示，懸浮微粒的濃度雖然並未有明顯高於對照組的濃度。但是，細懸浮微粒中五種金屬元素的濃度包括 Cd、Cr、Cu、Ni、Zn 則有隨著距離排放源越近而濃度愈高的現象，且濃度已達統計上差異顯著的水準。肺功能的檢測發現，男學童之用力吸氣再將氣吐光為止的吐氣量有隨著距離電弧爐工廠越近，其表現有越差的趨勢。經身高與體重校正肺功能，我們發現男學童方面， Δ FVC 有隨著距離電弧爐鋼鐵廠越近，而呈現負值越大的現象。電弧爐工廠盛行風下風處的兩個採樣點之 Δ FVC 值均小於 0，相對的遠離電弧爐工廠的 C 點之 Δ FVC 值則大於 0，且此差異已達統計上顯著差異的水準。再以 Δ FVC 值小於 0 的百分比來觀察，很明顯的可以發現，距離電弧爐工越近， Δ FVC 值小於 0 的百分比呈現越高的現象。最後，以迴歸分析的方法探討 PM_{2.5} 中五種金屬的濃度對於肺功能改變量的影響性，結果顯示，男學童 Δ FVC 改

變量大小之影響性依序為 Cr、Cd、Ni、Cu、Zn，此與文獻中之動物細胞體外研究有一致的趨勢。

四、參考文獻

- [1]. Cheng, T. W., “Combined Classification of EAF Dust and Incinerator Fly Ash,” *Chemosphere*, 50, 47-51 (2003).
- [2]. Havlik T., M. Turzakova, S. Stopic and B. Friedrich “Atmospheric Leaching of EAF Dust with Diluted Sulphuric Acid,” *Hydrometallurgy*, 77, 41-50 (2005).
- [3]. Delfino, R.J., Zeiger, R.S., Seltzer, J.M., Street, D.H., McLaren, C.E., “Association of asthma symptoms with peak particulate air pollution and effect modification by anti-inflammatory medication use,” *Environmental Health Perspectives*, 110, A607–A617 (2002).
- [4]. Gauderman, W. J., Avol, E., Gilliland, F., Vora, H., Thomas, D., Berhane, K., McConnell, R., Kuenzli, N., Lurmann, F., Rappaport, E., Margolis, H., Bates, D., Peters, J., “The effect of air pollution on lung development from 10 to 18 year of age,” *New England Journal of Medicine*, 351, 1057–1067 (2004).
- [5]. Horak Jr., F., Studnicka, M., Gartner, C., Spengler, J. D., Tauber, E., Urbanek, R., Veiter, A., Frischer, T., “Particulate matter and lung function growth in children: a 3-yr follow-up study in Austrian schoolchildren,” *European Respiratory Journal*, 19, 838–845 (2002).
- [6]. Junya, K., Masayuki, S., Shin, Y., Kenji, T., Guifan, S., “Effects of winter air pollution on pulmonary function of school children in Shenyang, China,” *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 209, 435–444 (2006).
- [7]. Hieu, N.T., Lee, B.K., “Characteristics of particulate matter and metals in the ambient air from a residential area in the largest industrial city in Korea,” *Atmospheric Research*, 98, 526-537 (2010).
- [8]. Kim, K.H., Mishra, V.K., Kang, C.H., Choi, K.C., Kim, Y.J., Kim, D.S., “The ionic compositions of fine and coarse particle fractions in the two urban areas of Korea,” *Journal of Environmental Management*, 78, 170-182 (2006).
- [9]. Moreno, T., Querol, X., Alastuey, A., Viana, M., Salvador, P., de la Campa, A.S., Artinano, B., de la Rosa, J., Gibbons, W., “Variations in atmospheric PM trace metal content in Spanish towns: Illustrating the chemical complexity of the inorganic urban aerosol cocktail,” *Atmospheric Environment*, 40, 6791-6803 (2006).
- [10]. Yatkin, S., Bayram, A., “Source apportionment of PM10 and PM2.5 using positive matrix and chemical mass balance in Izmir, Turkey,” *Science of the Total Environment*, 390, 109-123 (2008)
- [11]. Driscoll, K.E., Deyo, L.C., Carter, J.M., Howard, B.W., Hassenbein, D.G., Bertram, T.A., “Effects of particle exposure and particle-elicited inflammatory cells on mutation in rate epithelial cells,” *Carcinogenesis*, 18, 423-430 (1997).
- [12]. Donaldson, K.T., Mill, S., MacNee, W., Robinson, S., Newby, D., “Role of inflammation in cardiopulmonary health effects of PM,” *Toxicology and Applied Pharmacology*, 207, 483-488 (2005).
- [13]. Gavett, S.H., Madison, S.L., Dreher, K.L., Winsett, D.W., McGee, J.K., Costa, D.L., “Metal and sulfate composition of residual oil fly ash determines airway hyperreactivity and lung injury in rats,” *Environmental Research*, 72, 162-172 (1997).
- [14]. Adamson, I.Y.R., Prieditis, H., Hedgecock, C., Vincent, R., “Zinc is the toxic factor in the lung response to an atmospheric particulate sample,” *Toxicology and Applied Pharmacology*, 166, 111-119 (2000).
- [15]. Riley, M.P., Boesewetter, D.E., Kim, A.M., Sirvent, F.P., “Effects of metals Cu, Fe, Ni, V, and Zn on rat lung epithelial cells,” *Toxicology*, 190, 171-184 (2003).
- [16]. Takano, Y., Taguchi, T., Suzuki, I., Balis, J.U., Yuri, K., “Cytotoxicity of heavy metals on primary cultured alveolar type II cells,” *Environmental Research*, 89, 138-145.

電弧爐工廠附近空氣污染與學童肺功能檢測之關係研究

許惠悰^{1*}、黃彬芳²、張雅琪³、蕭雅文⁴

¹中國醫藥大學健康風險管理學系 副教授

²中國醫藥大學職業安全與衛生學系 教授

³中國醫藥大學健康風險管理學系系 學士生

⁴中興大學環境工程研究所 碩士

*通訊作者, Tel: 04-2205-3366 轉 6502, E-mail : hthsu@mail.cmu.edu.tw

摘要

本研究搭配空氣採樣與人體肺功能檢測，以觀察電弧爐煉鋼廠周邊之空氣污染情形，及其對人體健康的影響。結果顯示，懸浮微粒的濃度雖然並未有明顯高於對照組的濃度。但是，細懸浮微粒中五種金屬元素的濃度包括Cd、Cr、Cu、Ni、Zn則有隨著距離排放源越近而濃度愈高的現象，且濃度已達統計上差異顯著的水準。肺功能的檢測發現，男學童之用力吸氣再將氣吐光為止的吐氣量有隨著距離電弧爐工廠越近，其表現有越差的趨勢。經身高與體重校正肺功能，我們發現男學童方面， Δ FVC有隨者距離電弧爐鋼鐵廠越近，而呈現負值越大的現象。電弧爐工廠盛行風下風處的兩個採樣點之 Δ FVC值均小於0，相對的遠離電弧爐工廠的C點之 Δ FVC值則大於0，且此差異已達統計上顯著差異的水準。再以 Δ FVC值小於0的百分比來觀察，很明顯的可以發現，距離電弧爐工廠越近， Δ FVC值小於0的百分比呈現越高的現象。最後，以迴歸分析的方法探討PM_{2.5}中五種金屬的濃度對於肺功能改變量的影響性，結果顯示，男學童 Δ FVC改變量大小之影響性依序為Cr、Cd、Ni、Cu、Zn，此與文獻中之動物細胞體外研究有一致的趨勢。

關鍵字：電弧爐，肺功能，有毒金屬，細懸浮微粒，FVC

一、前言

電弧爐(Electric Arc Furnace, EAF)煉鋼是台灣鋼鐵產業重要的製程，每年粗鋼的總產能中約有一半左右是透過電弧爐的製程生產而來。在煉鋼的過程因電弧產生的高溫促使鋼液沸騰，造成鋼液中的有毒元素揮發並與氣流中的氧反應形成氧化物，最後凝結沉積產生細微之粉塵。相關的研究指出，其粉塵包括Fe、Zn、Ni、Pb、Cd、As及Cr等毒性元素[1,2]，而當空氣污染處理不妥善時，含有害金屬物質成份的懸浮微粒(Particulate Matter, PM)即可透過煙道排放至周界，造成空氣污染和人體健康危害等問題。

相關的研究指出，PM₁₀和PM_{2.5}會增加氣喘的呼吸道症狀，以及降低人體肺功能(Pulmonary Function)的

表現[3]。此外，空氣污染物的慢性效應，在經由長期追蹤世代研究後發現，暴露到的空氣污染物濃度上升會對兒童肺功能發展有顯著負面的影響 [4,5]。

由於文獻中對於電弧爐製程所產生之懸浮微粒對其周邊之空氣污染情形的探討非常的有限，且對於這些懸浮微粒中之有害金屬成分造成人體健康之影響情形亦非常的不足，特別是針對敏感性族群的呼吸系統的健康風險問題，是極有必要做深入的探討與研究。所以我們特別針對中部某一大型電弧爐煉鋼廠，在其鄰近周邊選擇了三所國小，其中A、B兩所國小所在之位置距離電弧爐鋼鐵廠較近且為盛行風的下風處、C國小則距離電弧爐鋼鐵廠較遠且為盛行風的上風處，進行空氣品質的監測，主要針對PM濃度(PM₁₀及PM_{2.5})

以及分析PM中9種金屬成分(Al, As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn)的濃度；同時，我們亦在此三所國小進行學童的肺功能檢測，然後根據空氣品質及肺功能檢測之結果進行比較分析，探討是否距離電弧爐工廠較近之國小學童其肺功能會較距離較遠之國小學童差，並且瞭解肺功能的表現與懸浮微粒中金屬成分的相關性及影響。

二、研究方法

2.1 採樣點

本研究共設置三個空氣品質採樣測站，分別以A、B和C表示(如圖1)，A採樣點的位置位於近電弧爐煉鋼廠污染源的東南方約0.5 km處，B採樣點的位置則為污染源的西南方約1 km處，而在B採樣點西南方位置約2.05 km處有一座焚化爐，而C採樣點位於污染源東北方約4.2 km處，附近主要以農田為主，其北方約0.39 km處有大安溪流，因本研究C採樣點屬於離電弧爐煉鋼廠較遠，較不受到電弧爐煉鋼廠排放的影響，因此可作為與近污染源地比較的對照測站，將其與近污染源地區的採樣結果(A、B採樣點)作比對。

2.2 懸浮微粒採樣方法

本研究於2010年的11月及2011年的2月及7月分別在三個採樣點進行PM_{2.5}及PM_{2.5-10}的採樣。採樣的方法是利用雙粒徑高量採樣(Model TE-6000 PM₁₀)並加裝細粒徑採樣衝擊板(Series 230 High Volume Cascade Impactor Model TE-231 PM_{2.5}, Tisch Environment)，搭配利用石英濾紙(Pallflex 出產，型號55356, QTY.25)分別採集細粒PM_{2.5}和粗粒PM_{2.5-10}的大氣懸浮微粒。採樣中，以1.13 m³ min⁻¹之流量抽引大氣中之懸浮微粒進入採樣器內，藉由衝擊板分成粗粒與細粒。每次採樣的時間為24小時，如此連續採樣3天，每個採樣點共取得9個樣本。

濾紙在採樣前後均以調理箱內調理24小時以上，秤重時的條件，溫度在23±3°C，濕度則為45±5%的範圍內進行。如此以求取大氣懸浮微粒PM_{2.5}及PM_{2.5-10}之質量濃度。



圖 1. 本研究空氣品質及肺功能採樣點位置圖

2.3 大氣懸浮微粒元素分析方法

本研究利用微波消化的方式將濾紙採集到的PM樣本，以10 ml 5.55%的HNO₃加上10 ml 16.75%的HCl進行消化。消化完成後，待冷卻後，加入去離子水至體積為50 ml。然後利用Perkin Elmer公司之型號Elan 6100之感應耦合電漿質譜儀(Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry, ICP-MS)進行微粒中金屬元素的濃度分析。

2.4 學童肺功能檢測

本研究利用MIR MiniSpiro PC-based Spirometer肺功能量計來測量參與此項研究學童之肺功能。研究過程中，我們先取得中國醫藥大學醫學倫理委員會的同意，始進行相關之研究。我們分別在2011年的1月至參與研究的三所國小舉辦說明會，取得家長的同意函，並填寫暴露情形的問卷資料，然後再進行肺功能的檢測。肺功能的檢測完全依照美國胸腔協會(American Thoracic Society, ATS)建議的準則；測量肺功能時，受試者站立並且戴上鼻夾，獲得至少三次可再現的用力呼氣流量曲線[6]。另外，受試者必須排除六個禮拜內曾經有肺部感染的疾病，例如流行性感冒患者。

三、結果與討論

3.1 大氣懸浮微粒採樣結果

圖2為本研究在夏冬兩季三個採樣點之採樣結果之比較。從圖中可以看出A、B、C三個採樣點在

夏季之採樣的平均 PM_{10} 的濃度分別為 47.0、45.3、和 42.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；而冬季期間之 PM_{10} 的平均濃度則分別為 81.8、80.0、及 77.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。相對的，三個採樣點在夏季之採樣的平均 $PM_{2.5}$ 的濃度分別為 31.0、30.7、和 29.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；而冬季期間之 $PM_{2.5}$ 的平均濃度則分別為 52.8、53.3、及 51.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。雖然，監測的結果顯示電弧爐近距離的測站(A 與 B 點)所採集的 PM_{10} 與 $PM_{2.5}$ 之濃度有較遠距離測站(C 點)為高，但是經過 ANOVA 的檢定，三個測站在兩季之濃度的差異並未達統計顯著差異的水準。 PM_{10} 之檢定結果夏冬兩季之 p 值分別為 0.828 及 0.905；而 $PM_{2.5}$ 之檢定結果夏冬兩季之 p 值則分別為 0.945 及 0.948。

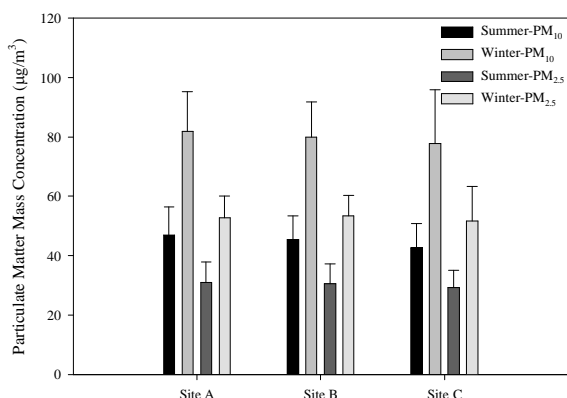


圖 2. 三個採樣點之夏冬兩季之 PM 的濃度比較

本研究在台灣中部的電弧爐工廠附近所測得之 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 的比值，夏季之平均值為 0.66，而冬季之比值則在 0.65 左右，顯示，在此地區所測得之 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 的比值相當穩定，並無隨著季節的變化而改變。與南韓的工業城釜山(Ulsan)比較[7]，本研究之 $PM_{2.5}$ 占 PM_{10} 之比例顯然有高於該工業區的現象。然與其他大城市之採樣結果比較，例如南韓的首爾(Seoul)[8]、西班牙的馬德里(Madrid)[9]、及土耳其的伊茲密爾(Izmir)[10]，則本研究在台灣之中部的中型都會區之電弧爐工廠周邊之採樣結果， $PM_{2.5}$ 占 PM_{10} 之比例，有稍低於都會區以交通排放源為主的趨勢。

3.2 細懸浮微粒中金屬元素分析

相關的研究指出，懸浮微粒影響人體健康的因子包括微粒之質量、粒徑大小的分布、微粒之成份等

[11]。而微粒的成份中，金屬的成份被視為重要影響呼吸系統之發炎反應之重要影響因子[12]。因此，我們特別針對細懸浮微粒($PM_{2.5}$)中之九種有毒金屬成分進行分析，以瞭解在電弧爐工廠周邊近距離採樣點所採集之細懸浮微粒中與遠距離點之間之差異性。

表 1. 三個採樣點 $PM_{2.5}$ 中九種有毒金屬成分分析結果

元素	Site A	Site B	Site C	p-值
$PM_{2.5}$				
Al	75.3±21.0	68.2±30.2	54.8±15.4	0.11
As	2.6±2.6	1.9±1.9	2.0±2.0	0.32
Cd	1.4±1.4	0.7±0.7	0.5±0.5	0.05
Cr	2.2±0.9	1.8±0.5	1.2±0.2	<0.001
Cu	21.4±12.1	19.7±14.4	8.5±3.7	0.02
Hg	0.2±0.1	0.2±0.2	0.1±0.0	0.06
Ni	6.8±6.6	3.5±1.3	2.4±1.2	0.02
Pb	105.5±102.7	120.6±130.0	41.0±61.2	0.09
Zn	302.7±195	221.8±201.3	55.8±24.7	0.002

單位： ng/m^3

表 1 為本研究中三個採樣點之 $PM_{2.5}$ 中九種有毒金屬之濃度分析結果。可以發現，距離電弧爐鋼鐵廠最近的採樣點 A 之金屬濃度均有最高的現象。特別是 Cd、Cr、Cu、Ni、Zn 等五種金屬元素之濃度，經 ANOVA 檢定，顯示其 p-值小於 0.05，亦即在統計上達差異顯著之水準。顯示，這五種元素之濃度與電弧爐鋼鐵廠間有顯著的相關。盛行風的下風處之 A 與 B 點，顯著高於上風處遠距離之 C 點，且有隨著距離電弧爐工廠越近，濃度有越高的趨勢。

3.3 肺功能分析結果

本研究除了在電弧爐工廠的鄰近周邊設置三個懸浮微粒的採樣站(三所國小)外，亦同時在此三個採樣站邀請了該校的六年級小朋友參與本研究之執行。總共有 215 位小朋友願意配合執行肺功能的檢測。

表 2 為三個採樣點之男、女學童之檢測結果。表中顯示，男學童之用力吸氣再將氣吐光為止的吐氣量(FVC)有隨著距離電弧爐工廠越近，其表現有越不佳

的趨勢，距離最近電弧爐工廠的 A 點，平均 FVC 為 2.45L，而距離最遠的 C 點，平均 FVC 為 2.81L，下風處之另一採樣點(B 點)，則介於兩者中間為 2.60L。此差異經 ANOVA 檢定($\alpha=0.05$)，已達統計上差異顯著的水準。顯示，距離電弧爐工廠越近的 A 校，FVC 有明顯表現最差的情形，相對的上風處且遠離電弧爐工廠的 C 校，男學童的 FVC 表現則明顯最佳。FEV₁ 雖然亦有此趨勢，然未達統計上差異顯著的水準。另外，三個地區之女學童的各項肺功能表現並未有顯著性的差異。不過，沒有差異並不表示女學童的肺功沒有受到影響，值得後續進一步的分析。

表 2. 三個採樣點之學童肺功能檢測結果

肺功能	Site A	Site B	Site C	p-值
男學童				
FVC	2.45±0.39	2.60±0.44	2.81±0.36	0.017
FEV ₁	2.22±0.34	2.34±0.39	2.46±0.29	0.078
FVC/FEV ₁	0.91±0.06	0.90±0.06	0.88±0.07	0.289
女學童				
FVC	2.42±0.36	2.41±0.42	2.40±0.34	0.972
FEV ₁	2.25±0.34	2.22±0.36	2.23±0.27	0.942
FVC/FEV ₁	0.93±0.05	0.93±0.04	0.93±0.08	0.880

3.4 肺功能與 PM_{2.5} 中金屬元素之關係

動物的實驗研究證實，實驗動物的肺部發炎反應與金屬的成分有關[13,14,15]。因此，本研究利用三個測站之 PM_{2.5} 中金屬的濃度及其所在學童之肺功能進行分析，以比較不同金屬之間的影响性。三個國小測站之 PM_{2.5} 中金屬濃度僅 Cd、Cr、Cu、Ni、和 Zn 在統計上呈現顯著差異的情形。因此，我們乃分析以此五種金屬元素，然後與三個學校之 Δ FVC 進行迴歸分析，以評估 PM_{2.5} 中金屬元素濃度改變一個單位， Δ FVC 的改變量之大小。其公式為：

$$\Delta FVC = b_0 + b_1 \times [PM_{2.5}]_i$$

其中， $\Delta FVC = FVC_{(實測值)} - FVC_{(預測值)}$ ， b_0 和 b_1 為常數， $[PM_{2.5}]_i$ 為 PM_{2.5} 中金屬元素濃度， i 為 Cd、Cr、Cu、Ni、Zn。

表 3 為迴歸分析之結果。此表中， b_1 的值表示各別元素對於 Δ FVC 之影響性大小，其值越大表示影響

性越大。表中顯示，男學童 Δ FVC 改變量大小之影響性依序為 Cr、Cd、Ni、Cu、Zn。

Takano 等人[16]利用動物細胞體外實驗的方法，分析不同濃度的金屬(Cd、Hg、Mn、Ni、Pb)造成肺泡細胞失去活性的細胞毒性大小，結果顯示，毒性最大的為 Cd 與 Hg，毒性為中等者包括 Ni 和 Pb，Mn 則幾乎沒有任何的毒性效應。我們的結果與該論文之排序有相同的趨勢。

表 3. PM_{2.5} 中 Cd、Cr、Cu、Ni、Zn 濃度與肺功能 Δ FVC 之迴歸分析

元素	b_0	b_1	R ²
男學童			
Cd	0.280	-0.287	0.543
Cr	0.634	-0.348	0.902
Cu	0.465	-0.026	0.999
Ni	0.289	-0.060	0.572
Zn	0.306	-0.001	0.946

四、結論

本研究搭配空氣採樣與人體肺功能檢測，以觀察電弧爐煉鋼廠周邊之空氣污染情形，及其對人體健康的影響。結果顯示，懸浮微粒的濃度雖然並未有明顯高於對照組的濃度。但是，細懸浮微粒中五種金屬元素的濃度包括 Cd、Cr、Cu、Ni、Zn 則有隨著距離排放源越近而濃度愈高的現象，且濃度已達統計上差異顯著的水準。肺功能的檢測發現，男學童之用力吸氣再將氣吐光為止的吐氣量有隨著距離電弧爐工廠越近，其表現有越差的趨勢。經身高與體重校正肺功能，我們發現男學童方面， Δ FVC 有隨著距離電弧爐鋼鐵廠越近，而呈現負值越大的現象。電弧爐工廠盛行風下風處的兩個採樣點之 Δ FVC 值均小於 0，相對的遠離電弧爐工廠的 C 點之 Δ FVC 值則大於 0，且此差異已達統計上顯著差異的水準。再以 Δ FVC 值小於 0 的百分比來觀察，很明顯的可以發現，距離電弧爐工越近， Δ FVC 值小於 0 的百分比呈現越高的現象。最後，以迴歸分析的方法探討 PM_{2.5} 中五種金屬的濃度對於肺功能改變量的影響性，結果顯示，男學童 Δ FVC 改

變量大小之影響性依序為 Cr、Cd、Ni、Cu、Zn，此與文獻中之動物細胞體外研究有一致的趨勢。

四、參考文獻

- [1]. Cheng, T. W., "Combined Classification of EAF Dust and Incinerator Fly Ash," *Chemosphere*, 50, 47-51 (2003).
- [2]. Havlik T., M. Turzakova, S. Stopic and B. Friedrich "Atmospheric Leaching of EAF Dust with Diluted Sulphuric Acid," *Hydrometallurgy*, 77, 41-50 (2005).
- [3]. Delfino, R.J., Zeiger, R.S., Seltzer, J.M., Street, D.H., McLaren, C.E., "Association of asthma symptoms with peak particulate air pollution and effect modification by anti-inflammatory medication use," *Environmental Health Perspectives*, 110, A607-A617 (2002).
- [4]. Gauderman, W. J., Avol, E., Gilliland, F., Vora, H., Thomas, D., Berhane, K., McConnell, R., Kuenzli, N., Lurmann, F., Rappaport, E., Margolis, H., Bates, D., Peters, J., "The effect of air pollution on lung development from 10 to 18 year of age," *New England Journal of Medicine*, 351, 1057-1067 (2004).
- [5]. Horak Jr., F., Studnicka, M., Gartner, C., Spengler, J. D., Tauber, E., Urbanek, R., Veiter, A., Frischer, T., "Particulate matter and lung function growth in children: a 3-yr follow-up study in Austrian schoolchildren," *European Respiratory Journal*, 19, 838-845 (2002).
- [6]. Junya, K., Masayuki, S., Shin, Y., Kenji, T., Guifan, S., "Effects of winter air pollution on pulmonary function of school children in Shenyang, China," *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 209, 435-444 (2006).
- [7]. Hieu, N.T., Lee, B.K., "Characteristics of particulate matter and metals in the ambient air from a residential area in the largest industrial city in Korea," *Atmospheric Research*, 98, 526-537 (2010).
- [8]. Kim, K.H., Mishra, V.K., Kang, C.H., Choi, K.C., Kim, Y.J., Kim, D.S., "The ionic compositions of fine and coarse particle fractions in the two urban areas of Korea," *Journal of Environmental Management*, 78, 170-182 (2006).
- [9]. Moreno, T., Querol, X., Alastuey, A., Viana, M., Salvador, P., de la Campa, A.S., Artinano, B., de la Rosa, J., Gibbons, W., "Variations in atmospheric PM trace metal content in Spanish towns: Illustrating the chemical complexity of the inorganic urban aerosol cocktail," *Atmospheric Environment*, 40, 6791-6803 (2006).
- [10]. Yatkin, S., Bayram, A., "Source apportionment of PM10 and PM2.5 using positive matrix and chemical mass balance in Izmir, Turkey," *Science of the Total Environment*, 390, 109-123 (2008)
- [11]. Driscoll, K.E., Deyo, L.C., Carter, J.M., Howard, B.W., Hassenbein, D.G., Bertram, T.A., "Effects of particle exposure and particle-elicited inflammatory cells on mutation in rate epithelial cells," *Carcinogenesis*, 18, 423-430 (1997).
- [12]. Donaldson, K.T., Mill, S., MacNee, W., Robinson, S., Newby, D., "Role of inflammation in cardiopulmonary health effects of PM," *Toxicology and Applied Pharmacology*, 207, 483-488 (2005).
- [13]. Gavett, S.H., Madison, S.L., Dreher, K.L., Winsett, D.W., McGee, J.K., Costa, D.L., "Metal and sulfate composition of residual oil fly ash determines airway hyperreactivity and lung injury in rats," *Environmental Research*, 72, 162-172 (1997).
- [14]. Adamson, I.Y.R., Prieditis, H., Hedgecock, C., Vincent, R., "Zinc is the toxic factor in the lung response to an atmospheric particulate sample," *Toxicology and Applied Pharmacology*, 166, 111-119 (2000).
- [15]. Riley, M.P., Boesewetter, D.E., Kim, A.M., Sirvent, F.P., "Effects of metals Cu, Fe, Ni, V, and Zn on rat lung epithelial cells," *Toxicology*, 190, 171-184 (2003).
- [16]. Takano, Y., Taguchi, T., Suzuki, I., Balis, J.U., Yuri, K., "Cytotoxicity of heavy metals on primary cultured alveolar type II cells," *Environmental Research*, 89, 138-145.