

## 經過韓國上空的飛行亂流統計及可能來源

Statistics and Possible Sources of Aviation Turbulence over South Korea

周俊明<sup>1</sup>

### 一、介紹

亂流在飛機尺度（10–1000米）或直接影響飛機運作通常被稱為飛行亂流（Lester 1994）。由於經常導致乘員受傷，航班延誤，燃料損失，以及結構的破壞，自由大氣的飛行亂流受民用航空業嚴重關切。當意外發生在巡航高度層，而其中大部分乘客和機組人員都未繫上安全帶時尤其危險。根據國家運輸安全委員會（NTSB的2009年）2009年年度報告，在美國從1996年至2005年，亂流是與天氣有關的飛安事故的主因。在韓國從1957年到目前因天氣造成的飛機事故，亂流事件已占約24%，使得它成為天氣有關事故的首要因素[航空和鐵路事故調查委員會（ARAIB）的統計數據]由<http://www.araib.go.kr>可獲得相關訊息。

飛行亂流的可能來源包括對流系統，伴隨高層鋒面的噴流，複雜的地形，和慣性不穩定等。即使來源之間的關係和亂流還沒有完全理解，亂流事件的時空分佈提供了亂流可能來源的見解（Lane等 2009）。此外，在不同地區亂流事件的相對頻率可以提供遠程飛行計劃有用的訊息（Wolff和Sharman 2008）。因此許多涉及亂流事件統計分析的研究已進行，使用數值天氣預報模式（NWP）和透過亂流觀測，包括飛行員報告（PIREPs）和實地測量中所導出的診斷指數。前者有均勻覆蓋所有區域的優勢，但這種預

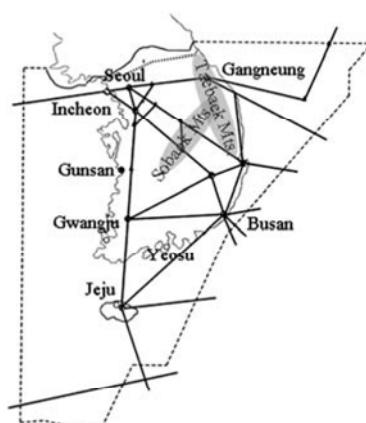
<sup>1</sup>臺北航空氣象中心

測亂流潛力的不確定性不能完全取代實際觀察到的亂流。另一方面，後者的優勢在於它精確報告飛行亂流的時間和地點，雖然有本質上的主觀感受。

在世界各地區亂流事件是基於飛機報告的特點。Wolff 和 Sharman (2008) 使用多年的PIREPs研究了美國本土 (CONUS) 上空的高層亂流的氣候。發現上層 (18000–60000英尺) 亂流的可能來源包括西部地區的山岳波和東北地區冬季的噴射氣流。佛羅里達州，德州東部和墨西哥灣沿岸上空相對較多亂流事件次數想必與對流雲有關。在格陵蘭，從2000年至2006年的PIREPs亂流事件在冬季相對較高。主要因素是地面氣旋引發的低對流層盛行東風遭阻斷的山岳波 (Lane等2009)。Lee和Choi (2003) 透過PIREPs調查從1996年至2000年韓國上空亂流事件的時空分佈。他們發現經由季節變化和空間分佈的區域差異，亂流事件在春季較為頻繁。

從地理上看，因為存在世界上最強的噴射氣流，韓國和亞洲東部有亂流事件顯著的潛力，(Jaeger和Sprenger 2007；Koch等2006)。此外，由於複雜地形面積超過70%的朝鮮半島，盛行西風能產生廣泛的山岳波。鑑於過去十年韓國和亞洲東部空中運輸的顯著增加，這一地區的飛行亂流的特性應進行調查。這將提供飛行員，調度員和預報員寶貴的資訊，以維護飛行安全和減少亂流意外傷害數量。

圖 1、虛線為韓國飛航情報區範圍，實線為標準航路，黑點為主要城市位置，陰影為山脈的名和稱位置。



## 二、飛行員報告（PIREPs）或飛機報告

目前在韓國，PIREPs 是唯一從飛機獲取的亂流例行觀測。在這項研究中使用以下步驟收集 PIREPs。首先，商用飛機的飛行員在仁川飛航情報區飛行（飛行情報區；圖 1）定期和非定期報告是否遭遇亂流，韓國航管控制中心（Korea Air Traffic Control Center KATCC）透過正規的語音無線電聯絡。這些 PIREPs 包括幾項的訊息，如位置，飛行高度，機型，風速和風向，亂流（和/或積冰）層和強度「無(NIL),輕度(LGT),中度(MOD),強烈(SEV),或嚴重強烈(EXT)」。第二，航管人員提供 PIREPs 文件訊息。最後，這些 PIREPs 的原始文本傳輸到韓國航空氣象局（KAMA），並在他們的數據庫積累。在這項研究中，從 2003 年至 2008 年（不含 2005 年，由於缺乏原始數據）的 5 年期間，品質管控去除重複和丟棄不含位置和飛行高度層的 PIREPs，共有 8449 筆 PIREPs 被應用。進行亂流統計調查前，應先審查不確定性的 PIREP 數據，如亂流強度和位置。PIREP 中的亂流強度是由飛行員的經驗作決定，記錄的地點有時與實地測量的亂流觀測真正地點相差超過數十到數百公里（Cornman 等人 2004）。此外，在相同的程度和時間範圍，PIREPs 的亂流強度報告會因飛機的類型和體積大小而有差異。提供本研究 PIREP 數據的飛機為重型及大型商用客機，如波音和空中巴士系列。

## 三、亂流統計

表 1 顯示從 2003 年至 2008 年通過韓國上空 PIREP 數據的次數和百分比。8449 份 PIREPs 飛行員報告中，分別有 1646，248 和 7 件報告對應輕度、中度和強烈事件。之前的 1996 年到 2000 年 5 年期間統計分析，經過韓國上空得到的 4709 筆 PIREPs 取得了 477，100，和 3 件對應輕度、中度

和強烈亂流事件（2003 年 Lee 和 Choi）。與以往的研究 Lee 和 Choi (2003) 相比，在本研究分析的亂流事件的絕對數量也較高；相對部分所有類型有嚴重性等級也較高（19.48% 相對於 10.13%，2.94% 相對於 2.12%，0.08% 相對於 0.07%，分別對應輕度、中度和強烈事件）。

表 1、在全部 8449 次數中，輕度、中度及強烈分別為 1646、248 及 7 例。比較另一統計 1996 到 2000 年全部 4709 次，輕度、中度及強烈分別為 477、100 及 3 例。百分比 分輕度 10.13 增加到 19.48；中度 2.12 增加到 2.94；強烈 0.07 增加到 0.08

| 亂流強度 | 次數   | 百分比   |
|------|------|-------|
| 無    | 4607 | 54.53 |
| 輕度   | 1646 | 19.48 |
| 中度   | 248  | 2.94  |
| 強烈   | 7    | 0.08  |
| 遺漏   | 1941 | 22.97 |
| 總和   | 8449 | 100   |

## 1、年度和季節分佈

圖 2 顯示從 2003 年到 2008 年調查亂流頻率的年度變化，全年所有的 PIREPs（包括遺漏的 PIREPs），以及輕度或更強（light or greater LOG），和中度或更強（moderate or greater MOG）等級事件。圖中也顯示各年 PIREPs 對比於全部所有 PIREPs 的相對比，以減少 PIREP 數據的偏差（2008 年 Wolff 和 Sharman。Lane 等 2009）。雖然每年全部的 LOG 及 MOG 程度事件的數量會隨年份有所差異，LOG 及 MOG 等級事件的數目

在 5 年期間，顯示增加的趨勢。尤其是 2008 年報告的 68 次 MOG 事件是在 2003 年 32 次 MOG 級事件報告數量的兩倍多。這種增長模式也同樣顯示 LOG 及 MOG 程度事件兩者的相對百分比，除了在 2007 年的 LOG 等級的事件。LOG(MOG)程度事件的相對百分比，從 2003 年的 28.92% (2%) 增加至 2008 年的 40.68% (6.51%)。

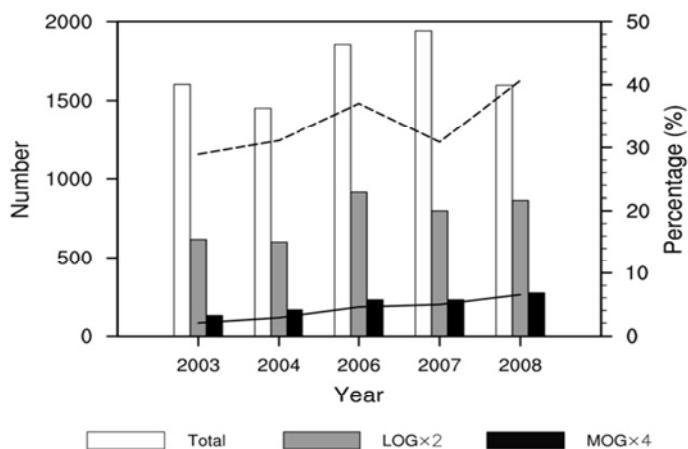


圖 2、從 2003 年至 2008 年經過韓國上空的亂流事件,年度全部的 PIREPs 為白條, LOG(輕度或更強)為灰條及 MOG(中度或更強)黑條的等級,以各年的 PIREPs 總次數為依歸, LOG 和 MOG 程度亂事件的相對百分比分別繪製為虛線和實線。為了更好的演示, 亂流事件 LOG 和 MOG 等級數字分別乘以 2 和 4。

為了調查這種日益增長模式可能的原因，使用區域數據同化及預報系統 RDAPS 的 30 公里的水平網格間距分析數據，來研究噴射氣流頻率與 LOG 和 MOG 級亂流事件之間的關係。如果水平風速大於每秒 40 米(高層噴射氣流風速門檻)附近發現一個 LOG 或 MOG 水平亂流事件，則該事件被視為與噴射氣流有關的亂流。

以年為區別，用所有的 PIREPs 為基準求得的頻率和相對百分比，從 2003 年[LOG(104/1603 的 6.5%), MOG(9/1603 的 0.6%)]到 2008 [LOG (159/1597 的 10%) MOG (27/1597 的 1.7%)]普遍提升。這意味著 2008

年通過韓國上空的大氣條件可能比 2003 年更有利於亂流的產生。雖然不可避免 PIREP 數據的不確定性仍然存在，這表明通過韓國上空亂流的預測變得更為重要。

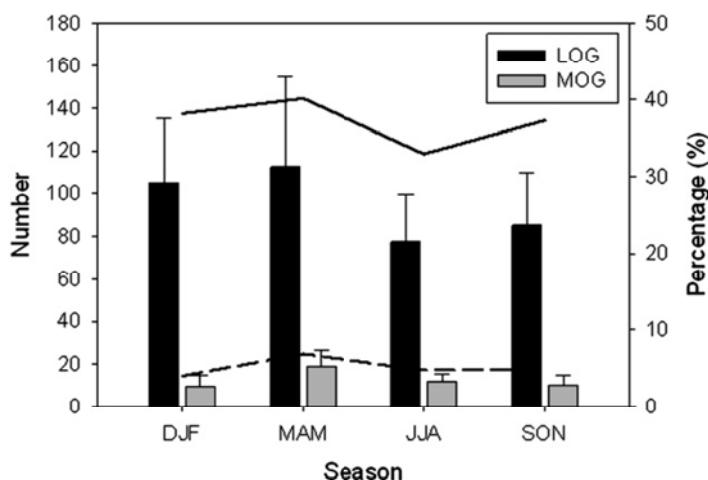


圖 3、從 2003 年到 2008 年 5 年期間通過韓國上空的亂流事件的季節頻率平均值 LOG (黑色) 及 MOG (灰色) 的等級，用各自的標準差與誤差相比。在一個給定季節全部 PIREPs 次數中的 LOG 和 MOG 等級事件相對百分比分別為實線和虛線。

圖 3 顯示了 LOG 和 MOG 等級事件的季節變化，LOG 等級事件的最高和次高頻率出現在春季和冬季。天氣分析來解釋這一季節變化，因噴射氣流軸心上方或下方增強垂直風切變會導致在冬季和春季飛行亂流更加頻繁。這種季節性的影響可能是由於冬季和春季的盛行西風帶，在氣候上比夏季和秋季更強。

針對 MOG 等級事件 (圖 3)，最高頻率發生在春季的月份，而第二個最高頻率發生在夏季。此外，MOG 等級事件在夏季和秋季月份的相對百分比都高於冬季的月份。鑑於夏天和秋天時傳入的季風系統和颱風相關的對流雲經常通過朝鮮半島，在這些季節的 MOG 級事件的頻率較高，可能與對流系統的存在是相關的。

## 2、水平和垂直分佈

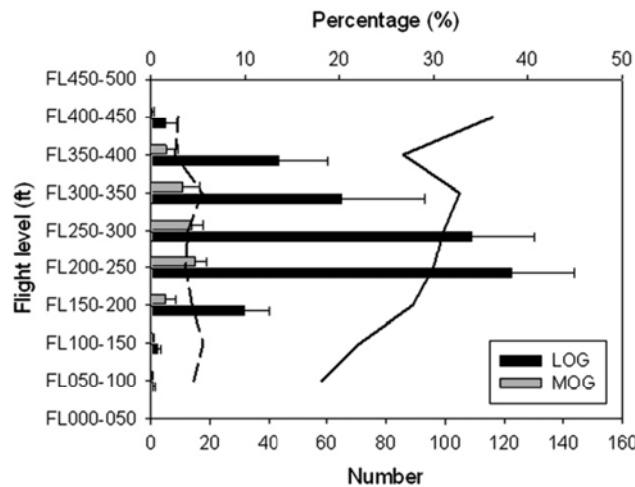


圖 4、與圖 3 類似，但為垂直頻率。

為了了解在韓國上空觀測到的亂流的垂直分佈，所有的 LOG 和 MOG 等級事件，以 5000 英尺為間隔排列，量化飛行高度與亂流強度相關。其中 LOG 和 MOG 等級事件的最大頻率期間出現在飛行高度 20000 和 25000 英尺（高度約等於 6.1-7.6 公里），為韓國國內客機主要飛行高度層。顯示此期間，韓國上空亂流強度與高度相關性並不顯著。

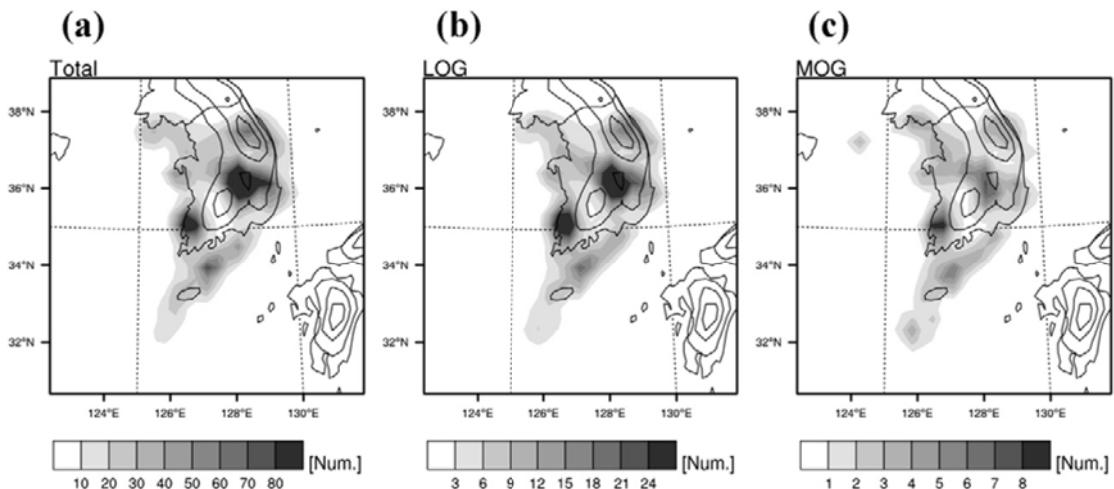


圖 5、從 2003 年到 2008 年 5 年，在 30 公里 X30 公里的水平網格框框，通過韓國上空的 PIREPs 亂流事件次數水平分佈 (a) 全部 (b) LOG，及 (c) MOG。地形高度以 200 米的間隔用實線輪廓。

為了確認韓國飛行亂流的水平分佈，全部及 LOG 和 MOG 等級事件

的頻率累加在 30 公里 X30 公里水平網格框，圖 5 所示如預期中，亂流事件是沿著現行韓國的航線為主，局部最大值沿著重要航路發生。頻率較高的 LOG 和 MOG 級事件發生於西海岸，濟州島，小白和太白山附近。

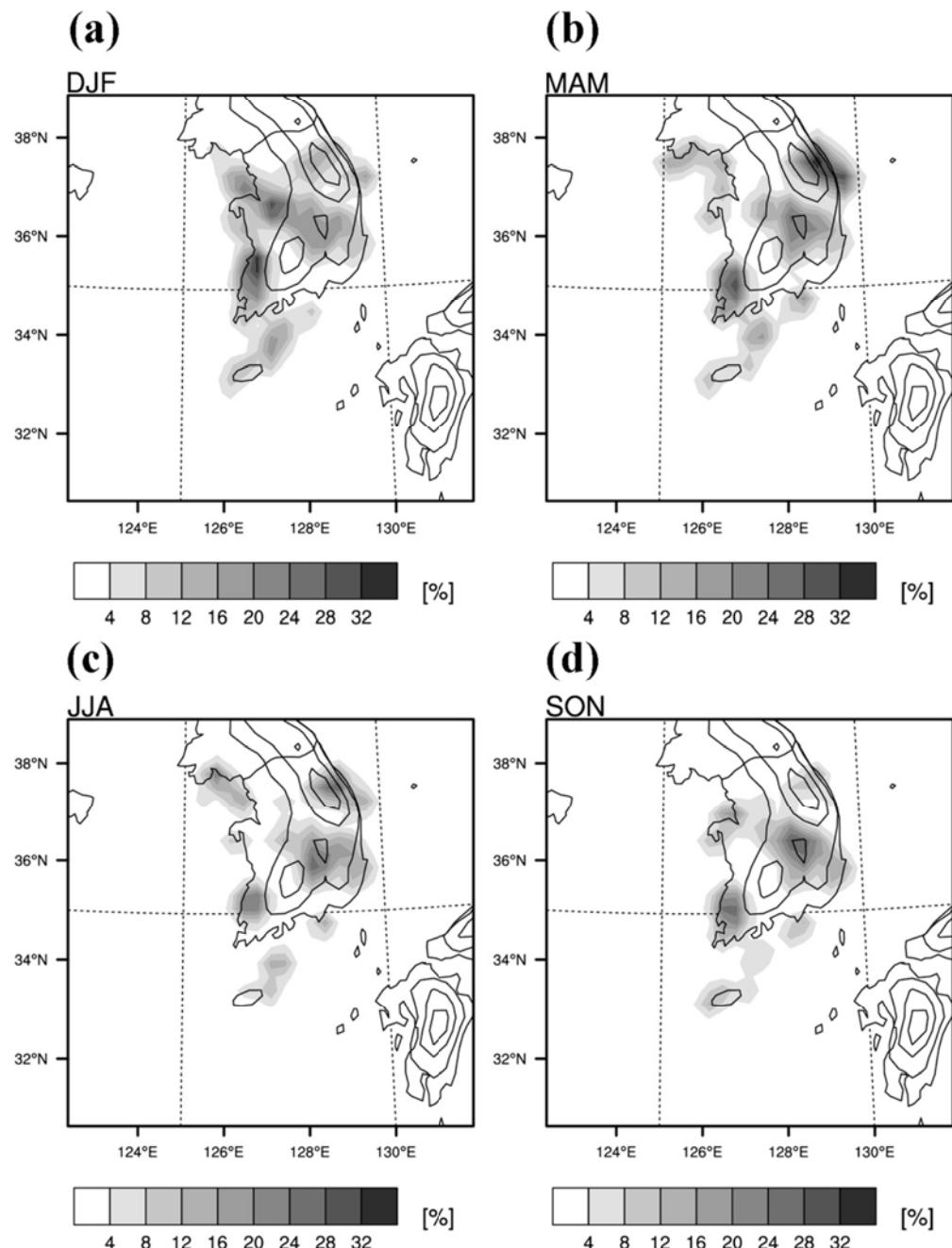


圖 6、從 2003 年到 2008 年，使用 5 年通過韓國上空的 PIREPs 中 LOG 程度亂流事件總數導出的相對百分比：(a) 冬季 (DJF)，(b) 春季 (MAM)，(C) 夏季 (JJA)，及 (d) 秋季 (SON)。

想要進一步了解區域飛行亂流模式，圖 6 顯示每個季節的 LOG 和 MOG 級事件的水平分佈。冬季和春季的整體百分比高於在夏季和秋季，這與圖 3 季節變化的結果是一致的。圖 5 上述四個地區與相對較高的頻率在不同季節有不同的亂流頻率。在冬季（圖 6a），沿韓國西海岸地區亂流事件發生得更為頻繁，特別是附近的群山，仁川，濟州島東北部。在春季（圖 6b），最大的亂流頻率位於江陵市附近的太白山的背風側，與附近在韓國西南部沿海地區的光州的頻率較高。夏季（圖 6c）與秋季（圖 6d），亂流的頻率相對較高的地區位於西南海岸附近，小白和太白山。雖然他們的頻率不若那些在冬季和春季大。在這些季節所觀察到的亂流的可能來源包括對流系統，噴射氣流，山岳波。

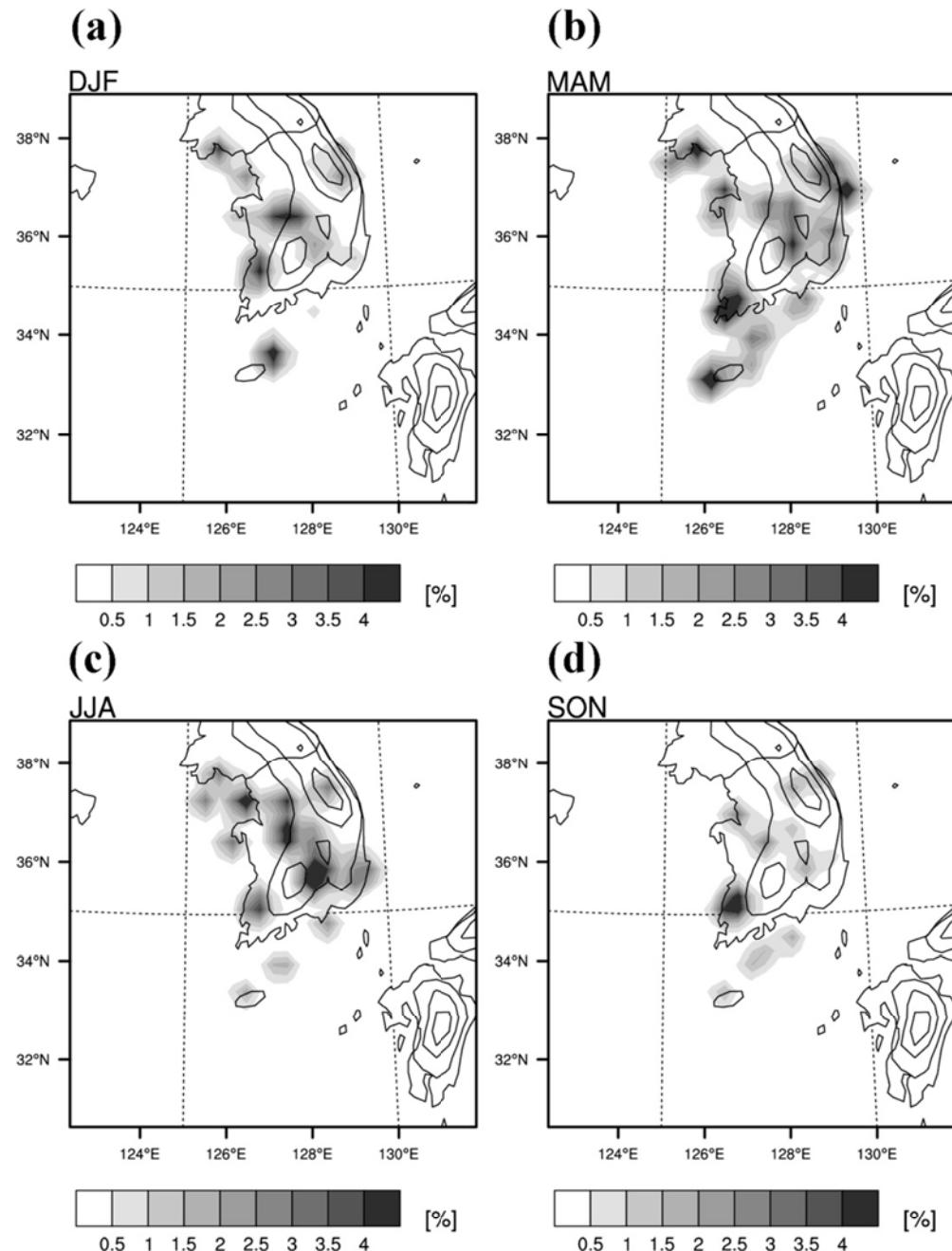


圖 7、同圖 6，但為 MOG 的程度。

圖 7 的 MOG 級亂流的結果與圖 6 類似，除了在夏季和秋季濟州島附近的相對較高的頻率，小白山脈太白山附近在冬季和春季的低頻率。整體的百分比是在春季和夏季的 MOG 級亂流頻率高於冬季和秋季。

## 四、亂流的可能來源

在本節中，觀測到的亂流事件的可能來源，經由使用閃電數據，氣象廳提供的一個 30 公里的水平網格間距 RDAPS 分析數據，和 30 秒分辨率的 DEM 數據集來進行調查。

### 1、對流系統

對流系統是飛行亂流的重要來源。關於對流系統的亂流事件，簡稱為對流引起的亂流 (CIT)。可分為兩類：雲中和雲外的 CIT 事件。根據他們的位置 (Lane 等 2003)。這些亂流事件的生成機制為雲邊界在小的水平距離內，垂直運動有強烈變化 (雲中對流不穩定)。由於雲邊界附近的氣流變形造成垂直風切變的增強 (Grabowski 和 Clark 1991)，雲邊界外因對流阻斷引起的重力波 (Lane 等 2003；Lane 和 Sharman 2008)。在文中，空間 100 公里和前後 40 分鐘有任何雲對地和雲對雲的閃電活動的亂流報告視為 CIT 亂流。

表 2、從 2003 年至 2008 年通過韓國的 CIT 及 CAT 的事件分類相應的數字和百分比，透過 PIREPs 獲得。包含：無，LGT，MOD 和漏失。文中所述的詳細分類方法。

|      | CIT |       | CAT  |       |
|------|-----|-------|------|-------|
| 亂流強度 | 次數  | 百分比   | 次數   | 百分比   |
| 無    | 365 | 49.8  | 4242 | 54.98 |
| LOG  | 152 | 20.74 | 1494 | 19.36 |
| MOG  | 28  | 3.82  | 227  | 2.94  |
| 漏失   | 188 | 25.65 | 1753 | 22.72 |
| 加總   | 733 | 100   | 7716 | 100   |

在表 2 中 2003 年至 2008 年在韓國上空的 CIT 和 CAT 事件對應的個別強度的數目及百分比。這顯示 CIT 無論是 LOG 和 MOG 等級的亂流事件都要稍高於 CAT 的情形。

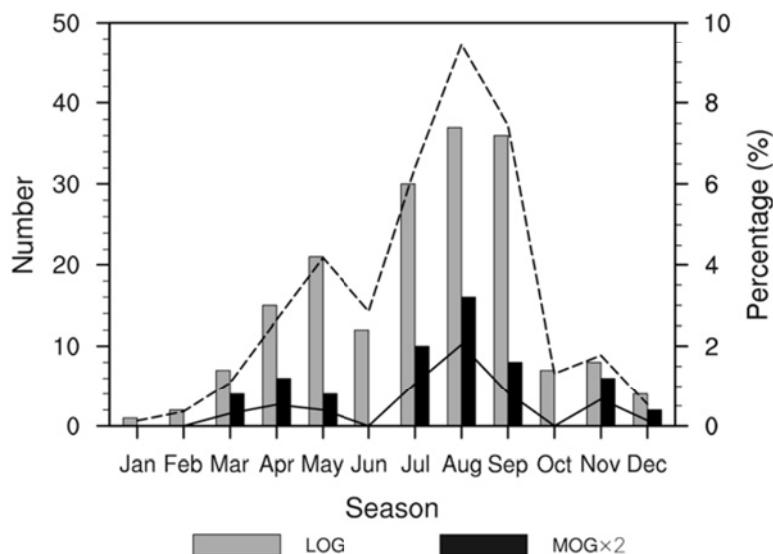


圖 8、從 2003 年到 2008 年通過韓國上空的 CIT 亂流事件月份次數，LOG 和 MOG 程度分別為灰色和黑色桿子。為辨識方便，MOG 等級乘以 2。虛線和實線分別為某個月內 CIT 事件中 LOG 和 MOG 與全部 PIREPs 次數相對百分比。

圖 8 顯示 CIT 事件在 LOG 及 MOG 每月的變化。如預期，當韓國上空被熱力作用或大尺度的輻合氣流引發的發展旺盛對流系統所主導，CIT 事件發生在夏季比其他季節更頻繁，以 8 月最常出現。

圖 8 亦顯示其他的明顯的成效。首先，相對較高的亂流事件的數量也出現在 9 月，颱風活動直接或間接地影響到朝鮮半島。第二，比較大的 CIT 事件的頻率發生在春季時，組織良好的對流系統通過朝鮮半島，伴隨偶爾開展的低壓系統。雖然 CIT 的事件的實際頻率可能被低估，因為飛行員通常盡量避免先前發現的對流系統。

## 2、對流層頂/噴射氣流

大部分的 CAT 事件可以解釋的 Kelvin-Helmholtz 不穩定性，一般 Richardson 數低於 0.25。這種不穩定經常出現強烈的噴射氣流軸上下位置，伴隨著上層鋒面。由於上層鋒生，動態的對流層頂向下折疊到中對流層。CAT 事件頻繁發生在對流層頂附近地區，引發對航空安全的威脅。為了區隔對流層頂附近區域伴隨噴射氣流發生的 CAT 事件，位於垂直上下 1 公里和前後 6 小時被認定為涉及到對流層頂/噴射氣流區域。此 CAT 事件被稱為為 TJCAT（對流層頂/噴流誘導的 CAT）事件。

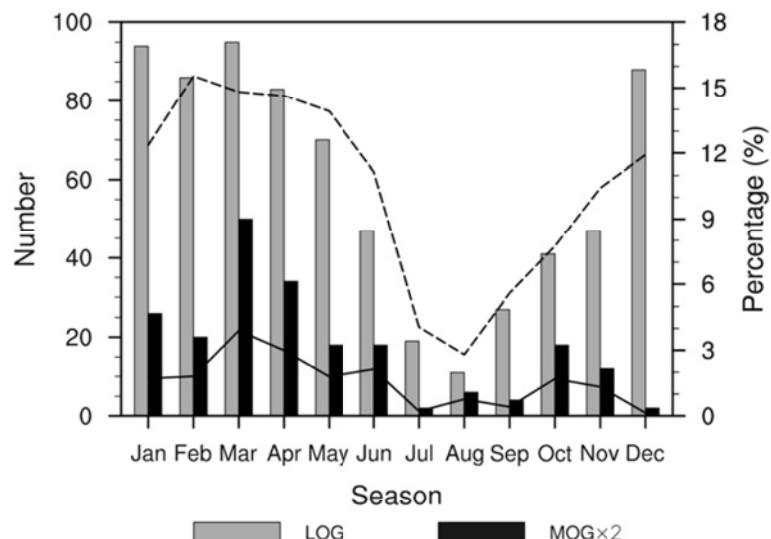


圖 9. 同圖 8，但 CIT 改為 TJCAT

圖 9 顯示 LOG 和 MOG 等級的 TJCAT 事件月份變化。圖 9 中 TJCAT 活動最頻繁發生在冬季和春季，TJCAT 事件的最大相對百分比分別約 2 月的 15.6%，和 3 月的 3.9%。考慮 TJCAT 活動最頻繁發生在 2 萬 5 千到 3 萬英尺 ( $Z=7.6\text{-}9.1$  公里) 的飛行高度層。這些季節性型態很可能是朝鮮半島在動態的對流層頂高度的季節變化。在夏季和秋季 ( $Z=12\text{-}13$  公里) 高於在冬天和春天 ( $Z=9\text{-}10$  公里)。

### 3、山岳波

山岳波是 CAT 事件的重要來源之一。垂直傳播的山岳波振幅由於空氣密度下降，會隨著高度增加，導致波動在高海拔區域 (Doyle 等 2005) 發生變陡，傾覆，和隨後的斷裂。為了區別山岳波的 CAT 事件，被山岳波阻斷引起的亂流的區域以山岳引起的重力波的阻力參數來診斷。在水平位於 30 公里內，垂直 1000 英尺和時間前後 6 小時，當附近的網格點有非零的山岳引起的重力波阻力的 CAT 事件，被視為有關山岳波的 CAT 事件。下文中，關於山岳波的 CAT 事件被稱為山岳波誘導的 CAT (MWCAT) 事件。

表 3 所示，從 2003 年至 2008 年韓國上空的個別強度相應 TJCAT 事件的數量和百分比，其中 LOG 和 MOG 級的 TJCAT 事件的數次分別為 603 和 105。考慮到的數量 LGT(MOG) 級在表 2 的 CAT 事件是 1494(227)，相對的 LGT (MOG) 級之間在全部的 TJCAT 事件 LGT (MOG) 級部分 CAT 的事件是約 40.4% (46.3%)。LGT 和 MOG 級之間 TJCAT 事件總數的 TJCAT 事件的相對部分，分別為 17.97% 和 3.13%。

表 3. 並從 2003 年至 2008 年超過韓國 PIREPs 獲得 TJCAT 及 MWCAT 事件分類相應的數字和百分比，包含：無，LGT，MOG，失蹤。文中所述的詳細分類方法。

|      | TJCAT |       | MWCAT |       |
|------|-------|-------|-------|-------|
| 亂流強度 | 次數    | 百分比   | 次數    | 百分比   |
| 無    | 1865  | 55.57 | 609   | 51.65 |
| LOG  | 603   | 17.97 | 273   | 23.16 |
| MOG  | 105   | 3.13  | 50    | 4.24  |
| 漏失   | 783   | 23.33 | 247   | 20.95 |
| 加總   | 3356  | 100   | 1179  | 100   |

2003 年至 2008 年韓國上空的 MWCAT 事件的數量和比例列於表 3，顯示 MWCAT 事件中，LGT 和 MOG 的 MWCAT 事件略高於相對的 TJCAT 事件。

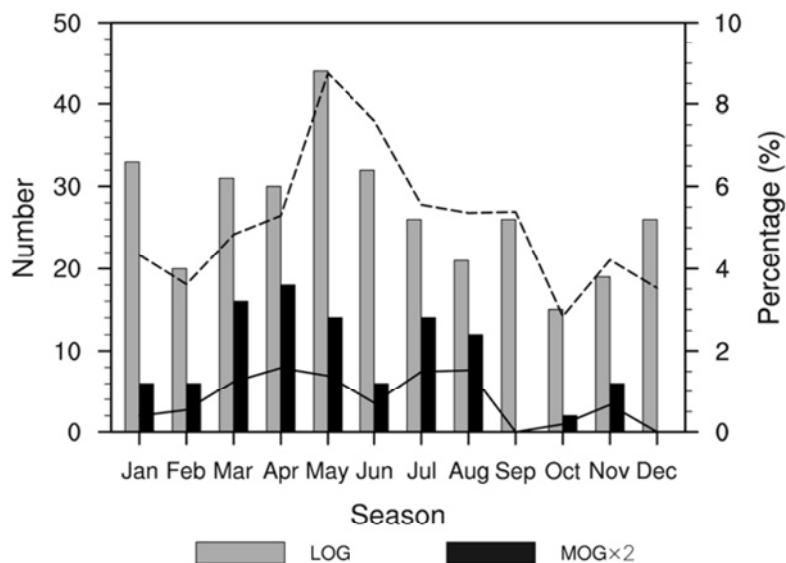


圖 10. 同圖 8，但 CIT 改為 MWCAT

圖 10 顯示了 MWCAT 事件的月份變化。MWCAT 事件在春季發生最頻繁。最大相對百分比約分別為 5 月份 LOG 的 8.7%，和 4 月份 MOG 的 1.6%。結果和圖 6 和 7 所示，太白山在春季的亂流頻率較高一致。在太白山背風面的下坡風暴發生頻率最高在春天，MWCAT 事件可能與山波阻斷有關。

在圖 10 的另一個顯著的結果是相對較高的頻率出現在夏季。根據北半球緯向平均風速，在夏季時對流層西風帶轉變到平流層下部東風帶的季節變化，可以在夏季的對流層頂附近的臨界層確定山岳波的位置。此外，西北太平洋副熱帶高壓向朝鮮半島的擴張偶爾在中低層對流層會引起東風和東南風，促使對流層中的流動逆轉和提高韓國山區的山岳波阻斷的潛力。在這些條件下，相對較高的頻率的 MWCAT 事件可以發生在夏季。

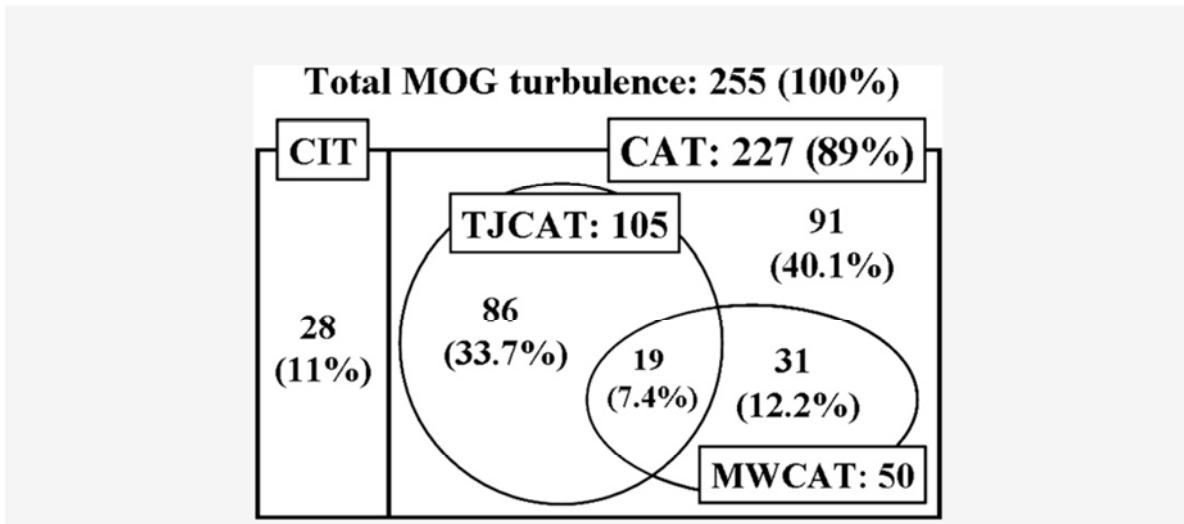


圖 11. 從 2003 年至 2008 年通過韓國上空的 MOG 程度亂流事件三個機制的維恩圖。

每個類別中的數字表示：發生次數和相對百分比。

圖 11 為從 2003 年至 2008 年發生在韓國的 MOG 級亂流事件三種衍生機制的維恩圖（對流系統，對流層頂噴射氣流，山岳波）。全部 MOG 等級亂流事件的最大部分（41.2%; 105/255）與對流層頂/噴射氣流相關；而分別有 19.6% (50/255) 和 11% (28/255) 與山岳波和對流系統的亂流事件相關；19 例（7.4%）發生同時由於對流層頂/噴射氣流和山岳波。

## 五、總結和討論

使用 KAMA 從 2003 年至 2008 年累計的 PIREP 數據，LOG 和 MOG 等級亂流頻率的相對百分比的上升趨勢明顯。這意味隨著韓國的以及東亞地區航空運輸增加，韓國上空的亂流預測正變得越來越重要了。在春季 LOG 和 MOG 級亂流事件的頻率和相對百分比是最高的。在空間分佈上，一直佔主導地位的飛行高度和航路的亂流事件發生最頻繁。接近西海岸，濟州島，小白和太白山沿途如預期有較高頻率。對這些地區的亂流頻率隨季節不同，可能是由於不同來源機制。要了解所觀察到的亂流事件生成機制，使

用閃電數據，RDAPS 分析數據和 DEM 數據集來調查三個潛在來源（對流系統，對流層頂/噴射氣流，山岳波）。全部飛行亂流事件分為對流引起的亂流（CIT）和晴空亂流（CAT）的事件，依照閃電活動的存在而定。全部的 MOG 級飛行亂流事件之間，CIT 和 CAT 相對部分分別為 11% 和 89%。CIT 事件在夏季的優勢主要是由於對流系統。CAT 的事件被分類為對流層頂/噴流誘導 CAT (TJCAT) 的和山岳波誘導 CAT (MWCAT) 的事件。全部的 MOG 級飛行亂流事件之間，TJCAT 和 MWCAT 的事件相對部分分別為 41.2% 和 19.6%。由於噴射氣流強度的季節性變化，TJCAT 事件在冬季和春季中佔主導地位。伴隨強烈噴射氣流的切變不穩定，慣性不穩定，和地轉適應與有可能為韓國 TJCAT 事件的產生機制。在韓國山區，春季和夏季 MWCAT 事件是佔優勢的，分別與阻斷及山岳波的臨界層有關。

即使不可避免的不確定性仍然持續在 PIREP 數據，這些通過韓國的亂流事件的結果可以提供有用和寶貴的訊息給駕駛員，調度員，及預測員，以幫助減少從對韓國遇到亂流的意外損壞。構建更可靠的通過韓國的亂流事件氣候學，需要收集較長時間 PIREP 數據。

## 六、參考資料

- Kim, J.-H., and Chun, H.-Y., 2011: Statistics and Possible Sources of Aviation Turbulence over South Korea. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **50**, 311-324.