

論文

연속상승운항을 위한 최적 공역 설계에 관한 연구

김은영*, 홍성권**, 이금진***

A Study on Optimal Airspace Design for Continuous Climb Operation

Eun-Young Kim*, Sung-Kwon Hong** and Keum-Jin Lee***

ABSTRACT

This paper introduces a new airspace design method for continuous climb operation (CCO). The optimization problem is formulated as Mixed-Integer Linear Program (MILP) to maximize the upper limits of altitude on the waypoints to facilitate continuous climb for aircraft. In the proposed method, the interactions with other flight procedures are considered as well as various aircraft flight performances. The proposed method is applied to one of the departure procedures of Incheon International Airport (ICN) to demonstrate its performances.

Key Words : Flight Procedure(비행 절차), Continuous Climb Operation(연속상승운항), Airspace Design(공역설계), Mixed-Integer Linear Programming(혼합 정수 선형 계획법)

1. 서 론

항공교통량이 지속적으로 증가함에 따라서 더욱 효율적이고 친환경적인 항공기 운항을 위한 공역 설계 방법이 활발히 연구되고 있다. 연속상승운항(CCO: Continuous Climb Operation) 및 연속강하운항(CDO: Continuous Descent Operation)은 이러한 노력의 일환으로 제안된 개념으로써 각각 항공기의 상승 및 강하 비행에서의 효율적인 운항을 가능케 하는 것을 그 목적으로 한다[1-4].

CCO 및 CDO를 위한 공역 설계 방법은 다양한 최적화 방법을 통해 제시되어왔다[1-3]. 최근 들어 몇몇 연구에서는 특정 공항에 최적의 CDO 절차를 설계한 후 다양한 실험을 통해 그 기대효

과를 평가하였다[1-2]. 또 다른 연구로써, 소음감소 출발절차를 설계하기 위한 최적화 방법이 연구되었다[3]. 이 연구에서는 다목적 최적화 방법을 활용함으로써 여러 지점에서의 소음을 효과적으로 감소시키는 방법을 제안하였다.

하지만 앞서 언급된 기존의 연구들은 각각의 비행절차를 최적화 하는데 있어 다른 절차와의 간섭이 고려되지 않아 그 적용이 매우 제한적이다. 실제로 접근관계공역의 절차 설계에서 가장 핵심적인 부분은 각 절차의 효율성을 최대로 함과 동시에 다양한 절차들 간의 분리가 보장되도록 하는 것이다[4-7]. 이는 특히 두 개 이상의 공항이 근접하게 위치해 있을 경우 더욱 중요하며, 이러한 경우 각 비행절차를 최적으로 설계하는데 있어 다른 절차와의 상호관계를 고려하는 것이 필수적이다.

본 논문에서는 최적의 연속상승운항 절차를 위한 새로운 공역 설계 방법을 제안하였다. 제안된 방법에서는 다른 절차와의 상호관계를 고려함과 동시에 항공기의 연속상승운항을 가능케 하기 위하여 상승 고도제한을 최소화하였으며, 이는 혼합 정수 선형

2015년 05월 06일 접수 ~ 2015년 05월 30일 심사완료
논문심사일 (2015.05.27. 1차)

* 한국항공대학교 대학원 항공교통물류학과

** 한국항공우주연구원 차세대항행팀

*** 한국항공대학교 항공교통물류학과 조교수

연락처, E-mail : eykim107@hanmail.net

경기도 고양시 덕양구 항공대학로 76

계획법(MILP: Mixed-Integer Linear Programming)을 통해 설계되었다. 또한 제안된 방법은 실제 출발 절차에 이를 적용하여 봄으로써 그 성능을 검증하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 제안된 최적 공역 설계 방법론을 소개한다. 3장에서는 제안된 방법론의 성능 분석 결과를, 마지막으로 4장에서는 본 연구의 기대효과와 추후 연구 과제를 제시한다.

2. 방법론

2.1 공역 및 비행 절차

Figure 1은 인천 및 김포국제공항의 남쪽 방향 활주로에 수립된 출발 및 도착절차를 나타내고 있다. Fig. 1에 나타난 바와 같이, 각 절차는 여러 개의 연속된 Fix로 구성되어있다. 절차를 구성하는 이러한 Fix는 수평적으로는 하나의 좌표로 정의되지만, 수직적으로는 다양한 고도제한을 통해 정의된다. 이러한 고도제한은 "at", "at or above", "at or below" 또는 "above and below" 중 하나로 표현되며, 이를 통해 각 절차는 서로 다른 절차들과 분리가 유지되며 항공기가 운항할 수 있는 비행 범위를 제시한다. 이상적인 경우, 다양한 성능의 항공기가 모두 최적의 연속상승운항을 할 수 있도록 하기 위해서는 출발절차의 각 Fix에 정의된 고도제한이 최소화되어야 한다. 하지만 Fig. 1에 나타난 바와 같이, 다양한 출발 및 도착 흐름이 존재하는 경우에는 절차간의 상호간

섭이 발생하게 되어, 이들 간의 분리를 위해 고도제한이 필요하게 된다.

2.2 최적화 문제 설정

본 논문에서는 하나의 출발절차를 대상으로 이를 최적화하는 연구를 수행하였다. 연속상승운항을 위한 최적의 출발절차 설계를 위해, 여러 제약조건을 고려하여 출발절차를 구성하는 Fix의 상한 고도를 최대화 하였으며, 이를 위해서는 혼합 정수 선형 계획법(MILP)을 사용하였다. 제약조건으로는 항공기의 상승 성능 및 다른 절차와의 분리를 고려하였다. 본 연구에서는 비행 절차의 수평적인 위치는 고정된 채 고도제한만을 결정변수로 사용하였다. 또한 인천국제공항에 수립된 다양한 계기출발절차 중 RNAV EGOBA 1K를 연구 대상으로서 선정하였다.

2.3 최적화 모형

본 연구에서는 하나의 출발절차를 다른 절차와의 간섭을 고려하여 최적화하였다. Figure 2에 나타난 바와 같이, 하나의 최적화 대상 절차(검은색 굵은 선)와 대상 절차와 교차하는 출발 절차(회색 점선) 및 도착 절차(회색 쇄선)를 고려하여 최적화 한다. 이 때, 최적화 대상 절차를 구성하는 Fix의 집합은 $T = [T_1 T_2 \dots]^T$ 라고 정의되며 i 번째 Fix T_i 는 다음과 같은 변수로 구성된다.

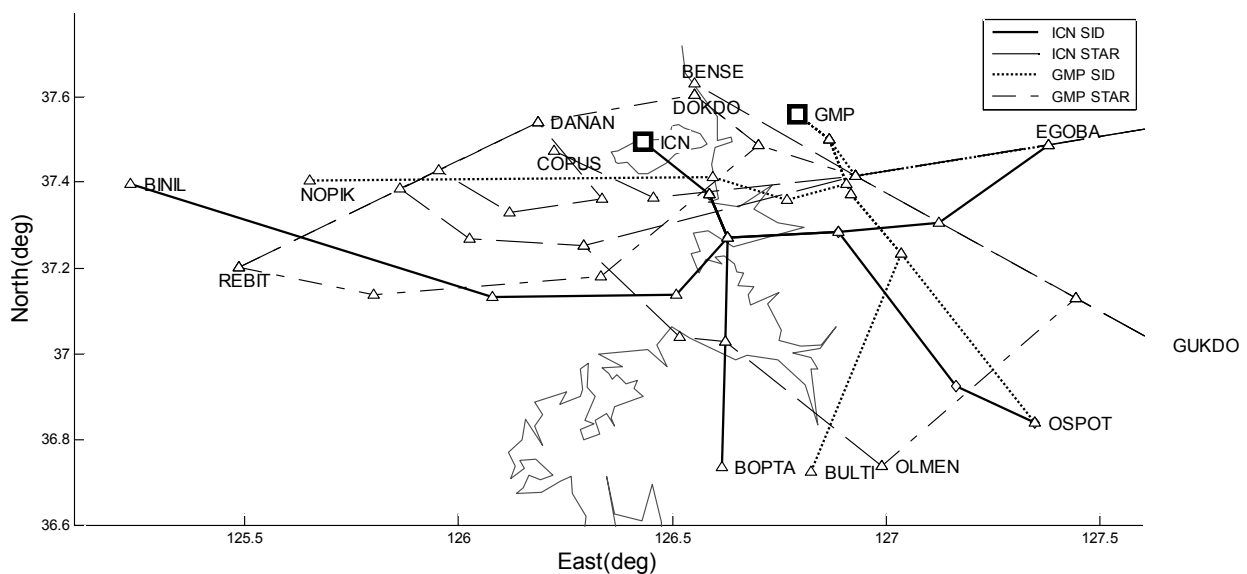


Fig. 1 Departure and arrival procedures for Incheon and Gimpo International Airport.

$$T_i = \begin{bmatrix} L_i \\ U_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 U_i 와 L_i 는 각각 T_i 에 할당된 고도제한의 상한 및 하한을 의미한다. 절차 T 와 교차하는 다른 절차들의 집합을 $G=\{G^1, G^2, \dots, G^M\}$ 라고 정의할 때, k 번째 교차절차를 구성하는 Fix의 집합은 $G^k = [G_1^k \ G_2^k \ \dots]^T$ 로 정의되며, k 번째 교차절차의 j 번째 Fix G_j^k 는 다음과 같은 변수로 구성된다.

$$G_j^k = \begin{bmatrix} L_j^k \\ U_j^k \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 U_j^k 와 L_j^k 는 각각 G_j^k 에 할당된 고도제한의 상한 및 하한을 의미한다. 만약 실제 절차 상에 존재하는 Fix 이외의 지점에서 교차절차 G^k 와 대상절차 T 가 교차할 경우, Fig. 2의 T_4 , T_6 와 같은 가상의 Fix를 추가 지정한다.

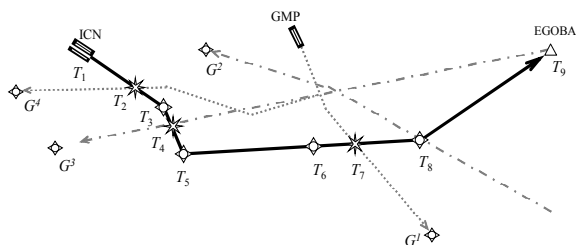


Fig. 2 Target procedure for optimization

2.3.1 목적 함수

항공기가 출발절차를 비행하는 동안 수평비행 없이 최적의 상승률을 유지하며 비행하기 위해서는 절차의 고도제한이 최소화되는 것이 중요하다. 특히 항공기는 절차의 상한 고도에 도달했을 경우 상승을 멈추고 다음 Fix까지 수평비행을 유지해야 하므로, 절차의 상한고도 제한이 연속상승운항을 저해하는 주원인이 된다. 따라서 본 연구에서 제안하는 최적화 모형의 목적함수는 출발절차를 구성하는 각 Fix에서의 상한고도를 최대화 하도록 설정하였으며 이는 다음과 같이 정의된다.

$$\text{Maximize: } \sum_{i=1}^n U_i \quad (3)$$

여기서 U_i 는 대상절차의 i 번째 Fix에서의 상한고도를 의미하며, n 은 대상절차를 구성하는 Fix의 총 개수이다.

2.3.2 제약 조건

2.3.2.1 상승성능 제약 조건

비행절차는 해당 절차를 비행하는 다양한 항공기 기종을 고려하여 설계되어야 한다. 다시 말해, 출발절차에는 그 절차를 비행하기 위해서 필요로 하는 최소필요상승률(minimum required climb rate)이 존재한다. 따라서 출발절차상의 연속된 Fix 간 하한고도 증가율은 최소필요상승률을 초과해서는 안 된다. 또한, 출발절차 상에서의 하한고도는 이전 Fix에서의 하한고도 보다 낮을 수 없으므로, i 번째 Fix에서의 하한고도 L_i 는 다음 조건을 만족하여야 한다.

$$L_{i-1} \leq L_i \leq L_{i-1} + d_i \times r_{\min} \quad \text{for } i=2,3,\dots,n \quad (4)$$

여기에서 d_i 는 $i-1$ 번째 Fix와 i 번째 Fix 사이의 거리; n 은 대상절차를 구성하는 Fix의 총 개수이며 r_{\min} 은 대상절차의 최소필요상승률이다. 이와 유사하게, i 번째 Fix에서의 상한고도 U_i 는 다음 조건을 만족하여야 한다.

$$U_{i-1} \leq U_i \leq U_{i-1} + d_i \times r_{\max} \quad \text{for } i=2,3,\dots,n \quad (5)$$

여기서 r_{\max} 는 최대가능상승률(maximum available climb rate)을 의미한다. 본 연구에서는 대상절차의 첫 번째와 마지막 Fix에서의 상한 및 하한 고도는 주어진 값으로 설정하였다. 따라서 첫 번째와 마지막 Fix에서의 고도제한은 다음 조건을 만족하여야 한다.

$$L_1 = L_I \quad (6)$$

$$L_n = L_F \quad (7)$$

$$U_1 = U_I \quad (8)$$

$$U_n = U_F \quad (9)$$

여기서 L_I 와 U_I 는 각각 대상절차의 첫 번째 Fix에 설정된 하한 및 상한고도이며, L_F 와 U_F 는 각각 대상절차의 마지막 Fix에 설정된 하한 및 상한고도이다. 마지막으로, 상한고도는 하한고도 보다 높거나 같게 설정되어야 하므로 다음 조건을 만족하여야 한다.

$$L_i \leq U_i \quad \text{for } i=1,2,\dots,n \quad (10)$$

2.3.2.2 절차 간 분리 제약 조건

대상절차 T 와 교차절차 G^k 는 교차지점에서 수직적으로 분리가 이루어져야 한다. 즉, 대상절차와 교차절차의 교차지점에서의 고도범위는 최소 분리치 이상으로 분리되어야 한다. 대상절차의 i 번째 Fix와 k 번째 절차의 j 번째 Fix에서 두 절차가 교차한다고 할 때, 절차 간 분리를 위해서는 다음 두 개의 조건 중 하나의 조건을 만족하여야 한다.

$$L_j^k - U_i \geq h_s \quad (11)$$

or

$$L_i - U_j^k \geq h_s \quad (12)$$

여기에서 h_s 는 교차지점에서의 수직분리 최소치; L_j^k 와 U_j^k 는 G_j^k 에서의 하한 및 상한고도이며, L_i 와 U_i 는 T_i 에서의 하한 및 상한고도이다. 식 (11)은 교차절차가 대상절차보다 높은 고도로 설정될 경우에 만족되어야 하는 조건이며(Fig. 3a), 식 (12)는 대상절차가 교차절차보다 높은 고도로 설정될 경우에 만족되어야 하는 조건이다(Fig. 3b).

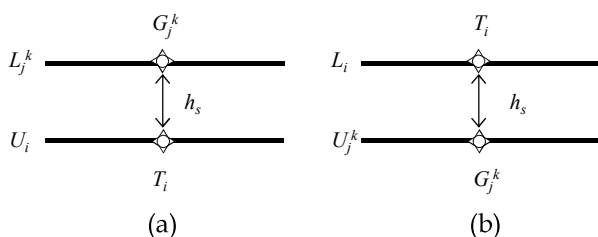


Fig. 3 Two vertical separation cases of interacting procedures.

식 (11) 및 (12)의 “or” 제약조건은 임의의 큰 수 M 과 0-1 2진 변수(binary variable) α 및 β 를 도입하여 다음과 같은 세 개의 “and” 제약조건으로 변환할 수 있다.

$$L_j^k - U_i + \alpha_{jk}M \geq h_s \quad (13)$$

$$L_i - U_j^k + \beta_{jk}M \geq h_s \quad (14)$$

$$\alpha_{jk} + \beta_{jk} = 1 \quad (15)$$

여기서 식 (15)는 “or” 제약조건 중 하나만이 만족되도록 하기 위하여 사용되었다.

3. 실험 결과

본 연구에서 제안된 방법은 Fig. 2에 나타나있는 인천국제공항에서 EGOBA Fix로 향하는 출발 절차에 적용되었다. 앞 절에서 언급했듯이, Fix의 수평적 위치는 고정한 후, 항공기 상승 성능과 타 절차와의 분리를 고려하여 절차를 구성하는 Fix에서의 고도제한을 최적화하였다. 또한 최소 필요상승률(r_{min}), 최대가능상승률(r_{max}) 그리고 수직분리 최소치(h_s)는 각각 7.5%, 10% 그리고 1,000ft로 설정되었다[5-6].

Fig. 4 및 Fig. 5에는 최적화된 절차와 현행 출발 절차에 대해 누적 비행거리에 따른 상한고도 프로파일이 나타나있다. Fig. 4에 나타난 바와 같이, 현행 절차와 비교했을 때 초기 상승 단계에서 상한고도가 개선되었음을 확인할 수 있다. Table 1에는 현행 및 최적화된 절차에 대하여 보다 자세한 수치가 나타나있다. 현행 절차 이용 시 T_3 Fix에서 상한고도가 5,000ft로 제한되어 있는 반면, 최적화 후에는 7,438ft로 증가하였다. 하지만 타 절차와의 분리로 인해 T_5 Fix 이후로는 최적화를 통한 상한고도 증대효과가 크지 않은 것을 볼 수 있다.

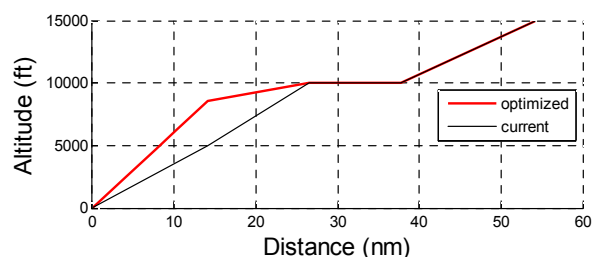


Fig. 4 Upper limits of the optimized procedure.

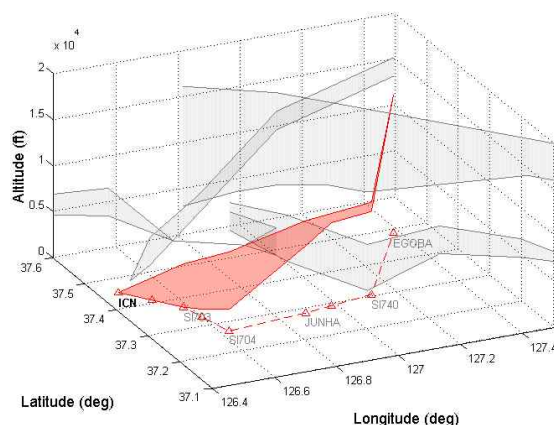


Fig. 5 Upper limits of the optimized procedure in 3-dimensional view.

Table 1. Descriptions of the optimized procedure.

Fix	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9
Distance (NM)	4	7.7	10.3	14.1	26.6	31	37.8	54.2
Current upper limit (ft)	—	—	—	5000	10000	—	10000	15000
Optimized upper limit (ft)	2429	↑ 4694	↑ 6263	↑ 8575	↑ 10000	— 10000	— 10000	↑ 15000
Climb rate (%)	10	10	10	1.8	0	0	5	

Table 1에 나타난 바와 같이, 최적화로 인한 고도 제한의 개선이 초기 상승구간을 제외하고는 미미한 것을 알 수 있으며, 이는 절차의 수평적 위치의 조정 없이는 개선의 한계가 있음을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 절차의 수평적 위치를 최적화 변수로써 포함하는 방법의 필요성을 확인하기 위하여, Fig. 6와 같이 수평적으로 조정된 가상의 절차에 대하여 제안된 최적화 방법을 적용하여 보았다. Fig 7 및 Fig 8에는 Fig. 6의 절차에 대한 최적화 결과가 나타나 있다. 또한 Table 2에는 최적화 결과에 대한 자세한 수치가 나타나 있다. Fig. 7은 현행 절차와 최적화된 절차에 대한 누적 비행거리에 따른 상한고도도 프로파일을 비교하여 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이, 최적화 후 상당 부분에서 상한고도가 개선되었으며, 수평 비행구간 또한 11.2NM에서 8.2NM로 줄어든 것을 확인할 수 있다.

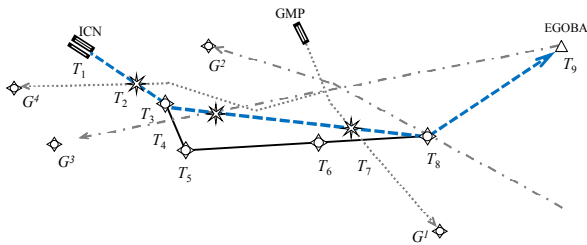


Fig. 6 Lateral modification of the target procedure.

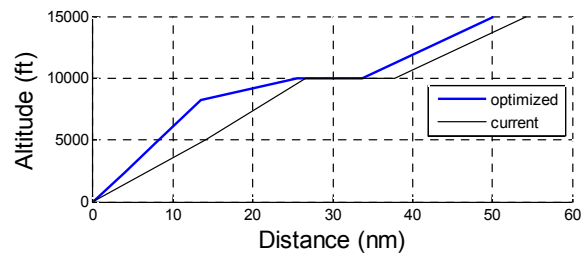


Fig. 7 Upper limits of the optimized procedure with lateral modification.

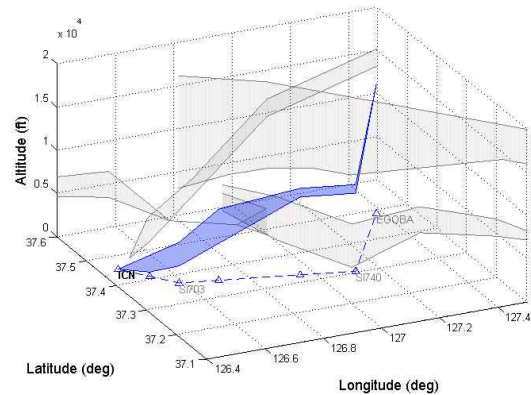


Fig. 8 Upper limits of the optimized procedure with lateral modification in 3-dimensional view.

Table 2. Descriptions of the optimized procedure with lateral modification.

Fix	T_2'	T_3'	T_4'	T_5'	T_6'	T_7'
Distance (NM)	4	7.7	13.5	25.5	33.7	50.1
Current upper limit (ft)	—	5000	—	10000	—	15000
Optimized upper limit (ft)	2429	↑ 4694	↑ 8222	↑ 10000	— 10000	↑ 15000
Climb rate (%)		10	10	10	0	5

4. 결 론

항공교통량이 지속적으로 증가함에 따라서 공역을 더욱 효율적으로 설계하는데 많은 관심이 모아지고 있다. 하지만 여러 조건을 고려하여 효율적인 절차를 설계하는 것은 쉽지 않고, 특히 다양한 항공교통흐름이 존재하는 접근관제구역에서의 출발 및 도착절차는 그 설계가 매우 복잡하다. 따라서 접근관제구역과 같이 복잡한 구역에서의 효율적인 절차 설계를 위해서는 수학적으로 잘 정의된 최적화 모형의 개발이 매우 중요하다.

본 논문에서는 항공기의 연속상승운항을 위한 최적 공역 설계방법을 제안하였다. 제안된 방법에는 혼합 정수 선형 계획법이 사용되었다. 제안된 방법은 다른 절차와의 분리를 고려하여 대상 절차의 고도제한을 최적화하도록 개발되었다. 또한 제안된 방법의 성능을 검증하기 위하여 인천국제공항의 한 출발절차에 대하여 이를 적용하여 보았다.

향후 연구에서는 대상절차의 고도제한뿐 아니라 수평적 위치를 포함하여 최적화를 수행하는 방법을 연구해야 할 것이다. 또한 제안된 방법을 실제 공역 설계에 활용하기 위해서는 최적화 모형에 사용되는 계수들을 더욱 엄밀히 탐구해야 한다. 이에 추가적으로, 연속상승출발절차와 연속강하도착절차간의 균형을 고려한 공역 설계에 대한 심도 있는 연구가 필요할 것이다.

후 기

본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 “항공기 출발 및 도착 통합 관리 기술 연구”과제 및 국토교통부의 “날다 프로젝트”로부터 지원을 받아 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1) Clarke, J. P., Ho, N. T., Ren, L., Brown, J. A., Elmer, K. R., Tong, K. O., and Wat, J. K., 2004, “Continuous Descent Approach: Design and Flight Test for Louisville International Airport,” *Journal of Aircraft*, Vol. 41, No. 5, pp. 1054-1066.

2) Clarke, J. P., Brooks, J., Nagle, G., Scacchioli, A., White, W., and Liu, S. R., 2013, “Optimized Profile Descent Arrivals at Los

Angeles International Airport,” *Journal of Aircraft*, Vol. 50, No. 2, pp. 360-369.

3) Prats, X., Puig, V., and Quevedo, J., 2011, “Equitable Aircraft Noise-Abatement Departure Procedures,” *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 34, No. 1, pp. 192-203.

4) ICAO, 2013, “Continuous Climb Operations (CCO) Manual,” Doc. 9993, AN/495.

5) ICAO, 2007, “Procedures for Air Navigation Services - Air Traffic Management,” Doc. 4444, ATM/501.

6) ICAO, 2006, “Procedures for Air Navigation Services - Aircraft Operations,” Doc. 8168, OPS/611.

7) K. Roach and J. Robinson, 2010, “A Terminal Area Analysis of Continuous Ascent Departure Fuel Use at Dallas/Fort Worth International Airport,” *AIAA Aviation Technology, Integration and Operations Conference (ATIO)*, Fort Worth, TX, AIAA 2010-9379.