

論文

B737NG 항공기 이륙 중 미부지면접촉에 관한 연구

노 건 수*

A Study on B737NG Aircraft Tail Strike during Takeoff

Kun-Soo Noh*

ABSTRACT

According to the aviation statistics, tail strike incidents and accidents are cyclic. Although many tail strikes occurred during takeoff, these are less than during landing cases. Many cases are related on human factors. In my opinion it is possible to analyze the causes of takeoff tail strikes to some extent. There are major casual factors of tail strike during takeoff such as; (1) Mis-trimmed horizontal stabilizer (2) premature rotation prior to V_R (3) Excessive pitch up rate during rotation (4) Improper use of the flight director. Among these causes improper use of flight director is excluded in this paper because it is recommended that pilot should use flight director after airborne. So I analyzed the other three causes as following. Firstly, because mis-trimmed stabilizer is related to center of gravity(CG), the relationship between stabilizer and CG is reviewed. Secondly, concerned premature rotation prior to V_R I reviewed the background of rotation speed(V_R) establishment and analyzed theoretically what speed leads to tail strikes. Thirdly, concerning excessive pitch up rate during rotation I analyzed what excessive pitch up rate can decrease ground clearance while using FDR data.

Key Words : 미부지면접촉(Tail Strike), 지상여유분(Ground Clearance), V_R (이륙전환속도), 수평안정판(Horizontal Stabilizer), 무게중심(Center of Gravity)

1. 서론

항공기 사고 통계자료에 의하면 미부지면접촉(Tail Strikes) 사례가 많지는 않지만 주기적으로 발생하고 있음을 알 수 있다. 미부지면접촉에 의한 손상은 그 자체로 수리비용이 많이 들기도 하지만, 더 큰 위험은 제대로 수리되지 않을 경우 압력 격벽(Pressure Bulkhead) 손상을 일으켜 큰 사고로 이어질 수 있다는 것이다. 미부지면접촉은 이륙과 착륙시에 발생하는데, 이 중 착륙시에 발생하는 것은 조종사의 기량에 기인하는 측면이 많으나 이륙시에 발생하는 것은 이론적인 분석이 어느 정도 가능하다고 판단하였다. 따라서 본 논문에서는 이륙시에

발생하는 미부지면접촉의 원인을 분석하고자 하였다. 이륙시 미부지면접촉의 주요 발생요인을 살펴보면; (1)잘못 조정된 수평안정판(Mis-trimmed Horizontal Stabilizer) (2)틀린 속도에서의 이륙전환(Wrong Speed) (3)과도한 피치율로 이륙전환(Excess Pitch Rate) (4)비행자세 지시기(Flight Director)를 미리 사용하는 것 등이다. 이 중에서 비행자세 지시기는 지상에서 표시되더라도 무시하고 공중(Airborne)에서만 사용하도록 권고되어 있으므로 논외로 하고 나머지 세가지에 대한 분석을 하고자 한다. 첫 번째로, 잘못 조정된 수평안정판은 무게중심(Center of Gravity)와 관련이 있으므로 무게중심과 수평안정판과의 관계를 분석하였다. 두 번째로, 틀린 속도에서의 이륙전환은 이륙전환속도(V_R)보다 낮은 속도에서 이륙전환을 했을 때 발생하므로 이륙전환속도의 설정 배경을 파악하여 이론상으로 어느 정도의 낮은 속도에서 미부지면접촉이 발생하는지

2009년 12월 04일 접수 ~ 2009년 12월 16일 심사완료

* 한서대학교 항공교통관리학과 조교수

연락처, E-mail: ksnoh@hanseo.ac.kr

충남 태안군 남면 신온리 한서대학교 태안비행장

를 분석하였다. 세 번째로, 과도한 피치율로의 이륙 전환은 사고사례에 대한 비행기록장치(FDR)의 자료를 이용하여 과도한 피치율이 지상여유분을 어느 정도 감소시키는지 분석하였다. 기종은 최근 국내선 및 근거리 국제선에 많이 운항하는 B737-800을 사용하였다.

II. 발생요인별 분석

2.1 미부지면접촉 통계자료

Fig.1은 미부지면접촉(Tail Strike)에 대한 통계자료인데, 년간 백만 착륙당 미부지면접촉 횟수를 보여주고 있다. 국내 항공사가 보유하고 있는 기종 중 B737-800과 B737-400이 상당히 높은 편이며, 2003년도 기준으로 백만 착륙당 0.9건이다. 그 다음으로 B767-300ER(0.6건), B747-400 (0.4건), B777-200(0.3건)의 순서를 보인다.

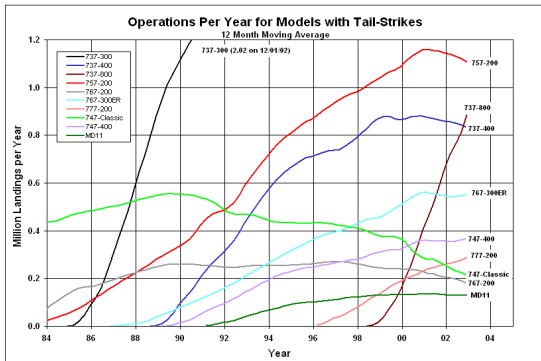
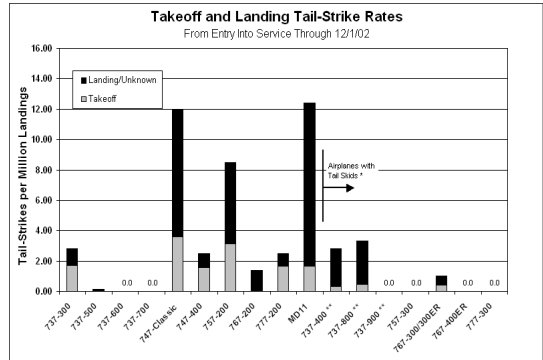


Fig.1 년도별 백만 착륙당 미부지면접촉 발생 횟수

(자료원: Boeing 사, Tail Strikes & Hard Nose Gear Landings - Asia Safety Conference, 2003)

Fig.2는 이륙 및 착륙시의 미부지면접촉 발생을 나타내고 있는데, 이륙보다 착륙에서 훨씬 더 많이 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 이는 공중에서 지상으로 착륙하는 경우 더 많은 변수가 작용하기 때문이다. B737-400, B737-800/900은 이륙시의 미부지면접촉을 방지하기 위해 'Tail Skid'라는 장비가 장착되어 있는데 미부지면접촉시 이 장비가 먼저 지상에 닿게 되고 그 이후에 충격이 심할 경우 동체가 손상된다. 'Tail Skid'는 착륙에는 사용되지 않으며, 이 통계자료에는 'Tail Skid' 손상만 있는 경우는 포함되지 않았다.



주: 737-900, 757-300, 767-400ER, 777-300은 항공기제작사에서 동일 형식의 기종과 동등한 지상여유분을 갖도록 이륙속도를 높였음.

(자료원: Boeing 사, Tail Strikes & Hard Nose Gear Landings - Asia Safety Conference, 2003)

Fig.2 이륙/착륙시 미부지면접촉 발생율

2.2 미부지면접촉 개념

이륙 활주(Takeoff Roll) 중 V_R 속도에 도달하면 부기장이 'Rotate(이륙전환)'라고 불러 준다. 이때부터 기장은 조종간을 잡아당겨 기수를 들게 되는데, 이 작용과 연계되어 미부의 지상여유분은 Fig.3과 같은 변화를 보인다. 주착륙장치(Main Landing Gear)는 V_{LOF} 에서 지상을 벗어나게 되는데 이때 최소 미부지상여유분(Minimum Tail Clearance)을 보인다. V_R 에서 V_{LOF} 까지는 대략 3초 정도 걸리며, B737 항공기 모델별 최소 미부지상여유분은 <Table 1>에 나와 있다.

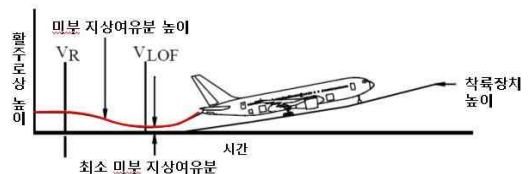


Fig.3 최소 미부지상여유분 개념도

<Table 1>은 737 항공기가 가장 많이 사용하는 두 개의 플랩(5와 15)에 대한 최소 미부지상여유분이다. <Table 1>에서 보면 737-800 항공기의 최소 미부지상여유분은 플랩 5일 때 20인치(51센티미터), 플랩 15일 때 23인치(58 센티미터)이다. 이 수치는 약간 낮은 등급의 737-700 항공기보다 각각 9인치/8

인치 적다. 그리고 737-800은 플랩 5에서 부양(Liftoff) 자세와 미부지상접촉을 일으키는 피치 자세(Pitch Attitude)의 차이가 2.8°의 여유밖에 없다는 것을 알 수 있다.

<Table 1> B737 기종별 최소 미부지상여유분

항공기 모델	플랩	부양 자세 (°)	최소 미부지상여유분 - 인치(cm)	미부지상접촉 피치 자세 (°)
737-600	5	9.0	28(71)	16.2
	15	8.7	30(76)	
737-700	5	9.1	29(73)	14.7
	15	9.1	31(79)	
737-800	5	8.2	20(51)	11.0
	15	7.8	23(58)	
737-900	5	7.6	20(51)	10.0
	15	7.2	23(58)	

2.3 이륙전환속도(V_R) 설정 배경

2.3.1 관련속도의 정의

FAR Part 25.107에 나와 있는 V_{MU}(Minimum Unstick Speed), V_R(Rotation Speed) 및 V_{LOF}(Liftoff Speed)의 정의를 살펴보면 다음과 같다.

(d) V_{MU} 는 CAS(Calibrated Airspeed: 수정대기 속도)로 표시된다.

- V_{MU}는 항공기가 안전하게 부양(Liftoff)할 수 있는 최소속도이다.

- V_{MU}는 최소 이륙전환속도(Min V_R)를 결정하는데 사용된다.

(e) V_R은 CAS로 표시되며, 본절 (e)(1)에서 (2)까지의 조건에 따라 선정되어야 한다.

(1) V_R은 다음의 속도보다 작아서는 안된다.

① V₁(Takeoff Decision Speed: 이륙결심속도)

② V_{MC}(Minimum Control Speed: 최소조종 속도)의 105%

③ 이륙면상 35피트에 도달하기 전에 V₂(Takeoff Safety Speed: 이륙안전속도)를 이룰 수 있는 속도

④ V_{MU}/빠른 전환(Rapid Rotation) 요건을 충족하는 속도

(2) 주어진 조건(중량, 이륙형태, 온도 등)에서, 다음의 두가지 조건을 충족하는 하나로 표시된 V_R

값이 사용되어야 한다.

- 엔진 한 개가 고장난 조건
- 엔진 모두가 작동되는 조건

(f) (1) V_{LOF}는 최초로 항공기가 부양되는 CAS로 표시된 속도이다.

(2) V_{LOF}는 최소부양속도(Minimum Unstick Speed: V_{MU})를 근거로 한 최소전환속도(Minimum Rotation Speed: V_R)를 결정하는 데 사용된다.

(3) V_{LOF}는 V_{MU}/Rapid rotation 조건을 충족시키는 데 사용된다.

2.3.2 이륙전환속도(V_R) 결정 방법

위에서 언급한 속도에 관한 정의에서 살펴보았듯이, V_R을 결정하기 위해서는 먼저 V_{MU}(최소부양속도)가 필요하다. 이것은 항공기 제작회사의 시험비행에서 결정된다. 많은 시험비행을 통해 얻은 V_{MU}에다 안전계수를 곱하여 V_{LOF}를 얻는다. 전엔진 작동시의 V_{LOF}는 V_{MU} × 1.10 이고, 한 개 엔진 고장시의 V_{LOF}는 V_{MU} × 1.05 이다. 이렇게 정한 V_{LOF}에서 V_R을 결정하기 위해서는 전환율(Rotation Rate)을 적용해야 하는데 보통 초당 4~6 도의 빠른 전환율(Rapid Rotation)을 적용한다. Fig.3에 나와 있는 바와 같이 빠른(Rapid) 전환은 정상(Normal) 전환보다 V_R과 V_{LOF} 사이에서 최소 속도차이(ΔV_{Rotation to Liftoff})를 발생하게 한다.

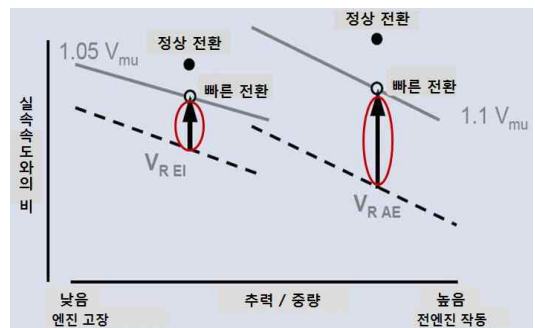


Fig.3 V_R 속도 결정 방법 - 전환율 적용

이때 비행에 필요한 받음각(Angle of Attack)은 빠르게 달성되므로 V_R은 최대의 여유분이 있는 전환속도가 된다. 시험비행에서 결정된 ΔV_{Rotation to Liftoff} 는 V_{MU} 기반으로 결정된 최소 V_{LOF}에서 감해준다. Fig.4에 나와 있는 바와 같이 산출된 V_R은 엔진 고장시와 전엔진 작동시의 두U 기되는데, 실제 운항에서는 하나의 V_R만 사용한다. 두 속도를 하나로 합성하는 방법은 전엔진 작동시의 V_R을 엔진 고

장시의 V_R 에다 다시 그리고, 최종 V_R 은 엔진 고장 시와 전엔진 작동시 중 높은 값으로 결정한다. 이와 같이 V_R 은 어느 정도의 여유분을 갖고 있으므로 정상적인 운항에서는 미부지면접촉이 발생하지 않는다.

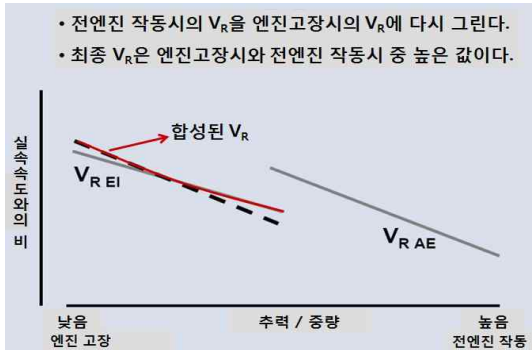


Fig.4 V_R 속도 결정 방법 - 합성 방법

2.3.3 미부지면접촉 발생속도 산출

<Table 2>에서 보면 플랩 5, 중량 140,000 lb 시의 이륙속도는 V_1 이 136 노트, V_R 이 137 노트, V_2 가 145 노트이다. 여기서는 V_R 설정시와 반대로 V_{MU} 를 추정해보고자 한다. 먼저 V_{LOF} 를 알아야 하는데 V_R 과 V_2 의 사이에 있으므로 중간값인 140 노트로 추정한다.

<Table 2. 737-800 이륙속도표>

WEIGHT (1000 LB)	FLAPS 1			FLAPS 5			FLAPS 10			FLAPS 15		
	V_1	V_R	V_2	V_1	V_R	V_2	V_1	V_R	V_2	V_1	V_R	V_2
180	162	163	167	155	157	161						
170	157	158	163	151	152	157	150	150	155			
160	152	153	159	146	147	153	145	146	151	142	142	148
150	147	148	155	141	142	149	140	141	147	137	138	145
140	141	142	151	136	137	145	135	135	143	132	132	140
130	135	136	146	130	131	140	129	130	139	126	127	136
120	129	130	141	124	125	136	123	123	134	120	121	132
110	122	123	136	117	118	131	116	117	129	114	115	127
100	116	116	130	111	112	126	110	110	124	107	108	122
90	109	109	125	104	105	120	103	104	119	101	101	117

전엔진 작동시 V_{LOF} 는 $1.10 \times V_{MU}$ 이므로 140 노트를 1.10으로 나누면 V_{MU} 는 127 노트로 산출된다. 엔진 고장시 V_{LOF} 는 $1.05 \times V_{MU}$ 이므로 140 노트를 1.05로 나누면 V_{MU} 는 133 노트로 산출된다. V_{LOF} 와 V_{MU} 의 차이는 전엔진 작동시 13 노트, 엔진 고장시 7 노트이다. 엔진 고장은 드문 경우이므로 전엔진 작동을 고려한다면 V_{LOF} 와 V_{MU} 의 차이가 13 노트 보다 더 낮은 경우 미부지면접촉의 가능성이 있다. 실제 운항시 사용하는 속도는 V_R 이므로 V_R 137 노트보다 13 노트 낮은 124 노트 아래로 설정할 경우 미부지면접촉의 가능성이 있다고 할 수 있

다.

2.4 무게중심과 수평안정판과의 관계

<Table 3>은 무게중심(CG: Center of Gravity)과 수평안정판과의 관계를 나타내고 있다. 무게중심이 뒤쪽으로 갈수록 수평안정판에서 필요한 기수올림 작용이 감소하기 때문에 동일한 플랩, 동일한 중량에서 무게중심(CG %MAC)이 뒤로 갈수록 수평안정판 설정값(Stabilizer Setting Unit)이 적어지는 것을 알 수 있다. 이로서 수평안정판의 역할은 아래로 향하는 힘을 발생하여 기수를 높여주는 작용을 하는데 이 힘이 작아져도 되는 것이다. 이 설정값을 잘못 입력하는 경우 힘의 균형이 맞지 않아 조종간을 더 앞으로 잡아당겨 피치율을 권고된 수치 이상으로 높여서 미부지면접촉 사고로 연결된다. 이것은 절차 점검표(Procedures Checklists) 항목에 포함되어 있지만 확실하게 보장하기 위해 상호점검(Crosscheck) 할 수 있는 방법이 필요하다.

<Table 3> 플랩별 수평안정판 설정값

Flaps 1 and 5	WEIGHT (1000 LB)	CG (%MAC)											
		6	8	10	16	21	26	30	32	34	36		
180	812	812	8	7	614	512	434	412	4	334			
170	814	814	734	634	6	514	434	414	4	334			
160	8	734	712	612	534	5	412	414	334	312			
150	8	734	712	612	534	5	412	4	334	312			
140	734	712	714	614	512	434	414	4	312	314			
130	712	714	7	6	514	412	4	334	314	3			
120	714	7	634	534	5	414	334	312	3	234			
110	7	634	612	512	434	4	312	3	234	212			
100	612	614	6	5	414	312	3	234	212	214			
90	612	614	6	414	414	312	3	234	212	214			

실제 항공기의 속도는 가장 불리한 전방한계 무게중심(FWD Limit CG)을 기준으로 산출된다. 이것은 <Table 2>에서도 확인할 수 있다. <Table 4>에 나와 있는 바와 같이 전방한계 무게중심 속도와 후방한계 무게중심(AFT Limit CG) 속도의 차는 4 노트 정도이다. 무게중심이 뒤쪽으로 갈수록 수평안정판에서 필요한 기수올림 작용이 감소하기 때문에 일정한 받음각(Angle of Attack)에서 양력이 증가한다. 속도가 늘어난 만큼의 양력이 증가했기 때문에 조종간에 가해지는 평균적인 힘이더라도 피치율을 높일 수 있다. 이것은 조종간에 가해지는 힘에 관한 것이기는 하지만 이런 원리를 확실히 이해한다면 미부지면접촉 방지에 도움이 될 수 있을 것이다.

1) 무게중심에 대한 일반항공(General Aviation)의 표시는 기준선(Datum Line)으로부터의 거리를 인치로 표시하는데, 운송용항공기에서는 평균날개시위값(MAC)의 %로 표시한다. 이것을 CG %MAC 이라고 한다.

<Table 4. 무게중심과 이륙속도와의 관계>

Flap 5 (20℃기준)							
FWD Limit CG (5 %)				AFT Limit CG (30 %)			
중량(lb)	V ₁	V _R	V ₂	중량(lb)	V ₁	V _R	V ₂
159000	146	147	153	159000	142	143	149
Flap 15 (20℃기준)							
FWD Limit CG (5 %)				AFT Limit CG (30 %)			
중량(lb)	V ₁	V _R	V ₂	중량(lb)	V ₁	V _R	V ₂
147000	136	136	143	147000	132	132	139

III. 사례 분석

<Table 5>는 737-800 미부지면접촉 사례를 종합적으로 분석한 자료인데, 요소별 감소치는 항공기제작사의 자료를 이용하였다.

<Table 5. 미부지면접촉 사례 분석>

요소	비행기록장치(FDR) 자료	여유분 감소(인치)	명목여유분 23인치에서의 여유분 감소(%)
속도(V_{LOF} 이하) 2.8 인치/노트	4 - 6	11" - 17"	47% - 73%
$-\Delta C_L$ (수평조작에 의한 양력 감소) $-\Delta C_L$ 0.1당 14인치	0.07 - 0.14	10" - 20"	43% - 86%
피치율			
평균 피치율(정상 평균을 초과분) 초당 0.1도 당 2.8인치	적용안함	적용안함	적용 안함
최대 피치율(초당 4도 초과분) 초당 0.1도 당 1.3인치	2.4	31"	134%
총 여유분 감소 합계		52" - 68"	224% - 293%

이 <Table 5>에 포함된 미부지면접촉 요소는 속도(부양속도 이하), 수평조작에 의한 양력감소($-\Delta C_L$) 및 피치율이고 각 요소에 대한 지상여유분 감소를 표시하였다. 피치율은 미부지면접촉(Tail Strike) 사고 분석시 두가지로 나누어 적용한다. 그 하나인 평균 피치율(Average Pitch Rate)은 초당 4도 미만에

서 정상 평균을 초당 2.5도 초과분 0.1도 당 2.8 인치를 지상여유분에서 감소시킨다. 또 하나는 최대 피치율(Maximum Pitch Rate)인데 이것은 초당 4도 이상에서 초과분 0.1도 당 1.3 인치를 지상여유분에서 감소시킨다. 명목여유분은 737-800 플랩 15일 때의 최소 지상여유분인 23인치를 적용하였다. 여기서 눈여겨 볼 점은 피치율인데 초당 4도 초과분 2.4도 하나만으로도 명목여유분 23인치를 모두 감소시킬 수 있다는 것이다.

IV. 결론

항공기 미부지면접촉 사고가 주기적으로 발생하고 있으며, 항공사 내부에서도 사고로 이어지는 않은 준사고 사례가 가끔씩 발생하는 것으로 보고되고 있다. 본 논문에서는 이륙시에 발생하는 미부지면접촉의 원인을 분석해 보았다. 이륙속도, 수평안정판 설정, 피치율을 정확하게 적용한다면 미부지면접촉이 일어나지 않겠지만 여러 가지 여건상 실수로 연결될 수 있다. 물론 비행훈련에 의해서 이런 문제가 어느 정도 해결될 수도 있지만, 이런 사례가 해당 항공기에 주기적으로 일어난다는 것은 각 요소별로 분석할 필요가 있다고 판단하였다. 늘 사용하는 이륙속도가 어떻게 설정되었으며, 무게중심이 후방에 위치할 경우의 효과, 무게중심과 수평안정판 설정과의 관계, 이륙전환시 과도한 피치율의 영향 등을 확실하게 이해하는 것이 미부지면접촉 사고 방지에 필요하다고 생각한다. 또한 737-800 항공기 운영측면에서의 잠재 가능성도 살펴볼 필요가 있다. 첫째, 국내 K항공사의 경우 737-800의 최대이륙중량(MTOW)은 크게 늘렸는데 엔진추력은 낮게(24K) 사용하고 있어서 허용이륙중량(AGTOW)을 늘리기 위해 플랩을 적게 사용하고 있다. 이 경우 최소 미부지상여유분(Minimum Tail Clearance)이 감소되는 결과를 초래하므로 미부지상접촉 잠재 가능성으로 여겨진다. 반면 국내 J항공사의 경우 엔진추력(26K)이 충분하므로 플랩각도 사용을 크게 할 수 있어서 지상여유분을 크게 할 수 있는 것과 대비된다. 둘째, 비행관리장치(FMS)에서 기준이륙속도(Reference Takeoff Speed)를 표시해 주는 기능이 있는데 사용하지 못하고 있다. 이것은 B747-400과 B777 항공기에선 기본제공품목이나 B737-800에선 선택품목이어서 구매를 하지 않은 것 같다. 이 기능을 이용하면 조종사가 속도를 잘못 입력하는 경우 일차적으로 확인을 할 수 있으므로 미부지면접촉 사고 방지에 유용할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] Boeing, 737-NG Flight Crew Training Manual, 2005
- [2] Boeing, 737-800 Flight Planning and Performance Manual, 2005
- [3] Boeing, 737-800 Takeoff Analysis Charts, 2009
- [4] Boeing, Tail Strikes & Hard Nose Gear Landings - Asia Safety Conference, 2003
- [5] Boeing Performance Software Version 2.1
- [6] FAR Part 25.107
- [7] Boeing, Flight Crew Performance Charts, 2002
- [8] Boeing, Tail Strikes and Strong Gusty Winds, 2006