

PAR효과에 의한 공력하중 변화에 관한 실험 연구*

이 동환, 김 탁

수송시스템공학부 (항공우주전공)

<요 약>

본 논문에서는 WIG기의 문제점인 이·착수시의 큰 수력저항을 극복하기 위한 해결책으로 사용하는 PAR효과가 WIG기의 공력특성에 어떤 영향을 미치는가를 풍동실험을 통하여 연구하였다. 또한, PAR효과를 최대로 하기 위한 PAR-Jet 노즐의 최적위치 선정 실험도 실시하였다.

익형은 NACA 6409를 모델로하여 End-plate를 부착하였으며 PAR-Jet가 날개전면에 고르게 분포될 수 있도록 하기 위하여 자체 제작한 PAR-Jet 노즐을 사용하였다.

PAR효과는 PAR-WIG기의 이·착수시의 저속에 국한되어 사용되기 때문에 레이놀즈수를 8.35×10^4 으로 고정시켜 실험을 실시하였다.

날개면의 압력분포를 측정된 결과 PAR 사용시 날개 아랫면의 정압증가로 인한 급증한 양력의 증가폭과 항력의 증가폭을 볼 수 있었으며 이에따라 양항비는 저하됨을 확인할 수 있었다. 또한 PAR-Jet 노즐의 최적위치 실험에서는 날개 전방으로 갈수록, 고도는 낮을수록 PAR효과가 증가함을 확인할 수 있었다.

An Experimental Study on Aerodynamic Characteristics of PAR-WIG

Dong Hwan Lee, Tak Kim

School of Transportation Systems Engineering

<Abstract>

In order to grasp the aerodynamic characteristics of Power-Augmented-Ram

* 본 논문은 1997년도 대학교비 연구비로 수행된 2개의 과제에 대한 연구 결과를 통합한 내용이며 연구비 지원에 대해 대학 당국에 감사드립니다.

Wing-in-Ground (PAR-WIG), the measurements of lift, drag, pitching moment, and pressure distributions on a low-aspect-ratio wing were carried out in the UOU wind tunnel. A PAR-Jet-Nozzle system was arranged in front of the wing.

Test Reynolds number based on wing chord length was about 8.35×10^4 . It is shown that the PAR effect remarkably increase lift and drag of the wing when the wing is close to ground surface. The end plate increase PAR effect and the position of center of lift moves forward due to PAR effect.

The variation of lift, drag and pitching moment with respect to PAR-Jet-Nozzle angle was measured also.

[기호표]

C_L : 항력계수

C_D : 양력계수

C_M : 피칭모멘트계수

C_F : 압력계수

C_T : PAR-Jet의 추력계수

E.P : 익단판(End Plate)

L.E : 앞전(Leading Edge)

T.E : 뒷전(Trailing Edge)

c : 날개 시위 길이

h : 지면판에서 T.E까지의 거리

S : 날개의 면적

S^* : PAR-Jet 노즐 구멍의 면적

V_∞ : 자유흐름의 속도

ρ : 공기밀도

θ_j : PAR-Jet의 분사각도

X_F : 앞전을 원점으로 한 지면판위 A,B,C점위치 (Fig 2.5)

X_j : 앞전을 원점으로 한 jet의 전면위치 (Fig 2.5)

Y_j : 지면판을 원점으로 한 jet의 수직 방향위치 (Fig 2.5)

1. 서론

1.1 연구 목적 및 배경

현대에 있어 지구촌이라는 말이 나올 만큼 교통체계가 발달하면서 더 빠르고 더 효과적인 수송수단이 요구되고 있다.

최근 차세대고속 수상수송기관으로서 100knots 이상의 고속에서 순항하는 지면효과익선, WIG(Wing-In-Ground-effect craft)기가 주목되고 있다.

이러한 WIG기는 순항할 때는 지면효과에 의해 고양항비로 비행하지만, 이수할 때는 수력저항을 이기기 위해 큰 추진력이 요구된다. 선체를 들어올릴 만큼의 양력이 필요하므로 날개면적을 크게 해야 하고, 착수할 때는 해수면으로부터 받는 충격을 견딜 수 있는 구조 강도를 필요로 한다. 이것 때문에 전체 중량에서 차지하는 구조중량이 커지고, WIG기의 성능을 악화시키고 있다. 더우기 파도가 있는 실제 바다에서 파도와와의 접촉을 피하고 지면효과를 이용하기 위해서는 WIG기의 대형화가 필수적이며 이대형화 문제의 해결 방안으로 날개 밑으로 공기를 불어 넣어 RAM효과를 증대시키는 'PAR 개념'이 도입되었다.

지금까지 PAR-WIG기의 공력특성에 대하여 발표된 예는 다수가 있으나 (참고문헌 [2],[4],[5])날개 특성에 관계한 정량적인 데이터는 제한되어 있다. 따라서 본 실험의 목적은 WIG기의 이착수시에 사용되는 PAR의 기본 개념을 이해하고 PAR-Jet에 관한 여러 요소들이 WIG기의 공력특성에 어떻게 영향을 미치는가를 파악하는 것이다.

1.2 PAR 효과

WIG기의 이 착수가 행하여지는 물은 공기보다 800배 가량 높은 비중을 가지고 있어, 물의 저항이 크기 때문에 WIG기가 지상에서와 같은 이륙속도를 내기 위해서는 지면효과를 받으며 순항할 때의 3배 가량의 고양력이 요구되고 날개의 대형화가 불가피하다. 또한, 착수시에 생기는 수면과의 충격을 이기기 위해 구조적 강도가 요구되므로 동체의 중량이 무거워진다.

위와 같은 문제점 때문에 대형화된 WIG기는 저속에서 이수할때 고양력이 필요하며이를 얻기 위해 'PAR(Power-Augmented-Ram)' 개념이 사용되고 있다.

Fig. 1.1에서 보는바와 같이 제트나 프로펠러를 날개 앞에 부착하고, 이것의 후류를 익단판(End Plate)으로 둘러싼 날개의 하단에 불어넣어 강제로 Air-cushion을 형성하여 정압을 증가시킨다. 증가된 정압은 날개의 양력을 직접 증가시켜서 WIG기가 낮은 속도에서 이수하게 됨으로써 이수시의 수력저항이 급격하게 감소하고 이것은 큰 추력장치에 대한 부담을 줄인다. 또한 착수시에 생기게되는 동체와 수면과의 충격을 완화시켜서 기체의 구

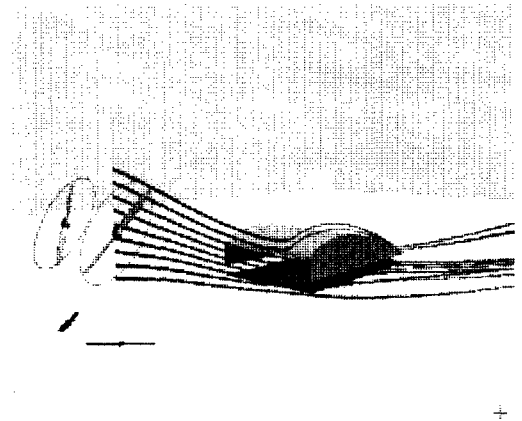


Fig. 1.1 PAR 효과의 원리

조중량을 줄일 수 있어 기체의 대형화에 따른 문제도 동시에 해결되는 잇점이 있다.

2. 풍동 실험

2.1 실험장비

- 풍동

- Test section : 600 mm × 400 mm, 최고속도 : 35 m/s, Open type

- PAR-Jet 노즐

Fig 2.1과 같이 균일한 PAR-Jet류를 얻기 위해 hole 사이의 간격이 75mm인

PAR-Jet 노즐 장치를 제작하였다.

- 직경 4mm의 7개의 구멍을 가진 1m의 관
- Air Tank에서 나오는 압축 공기를 사용
- Jet 입구 풍속 : 250 m/s
- PAR-Jet 풍속 : 노즐 입구 하류 230mm에서 약 25m/s

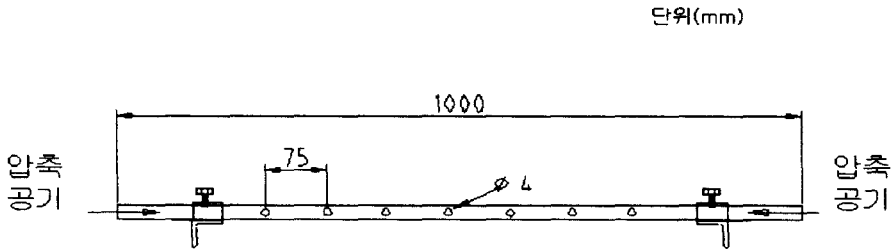


Fig. 2.1 PAR-Jet 노즐

2.2 실험 모델

- 공력하중 측정용 익형

Table 2.1 실험모델의 제원

익형	NACA 6409
Span × Chord	450 mm × 300mm
가로세로비	1.5
재질	발사
압력공	플라스틱관 (직경 1mm)

- 압력분포 측정용 익형

Fig. 2.2에서와 같이 스펠방향과 시위(chord)방향 압력분포를 측정하기 위해 참고문헌[6]에서 사용한 날개의 압력공수 보다 많은 54개의 압력공을 익단, 1/4스펠, 1/2스펠 위치에

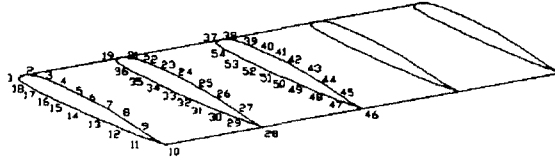


Fig. 2.2 압력분포 측정 익형 및 압력공 위치

각각 18개씩 동일하게 설치하여 정확한 압력분포를 측정하고자 한다.

2.3 PAR-Jet 특성 실험

- PAR-Jet 특성

PAR jet 노즐 장치는 Fig. 2.3과 같으며 Fig. 2.4는 노즐전방의 jet 특성을 보이고 있는데 노즐 하류 약 250mm거리에서 각각의 PAR-Jet류가 완전혼합되었고, 14~18m/s의 속도 분포를 가진다.

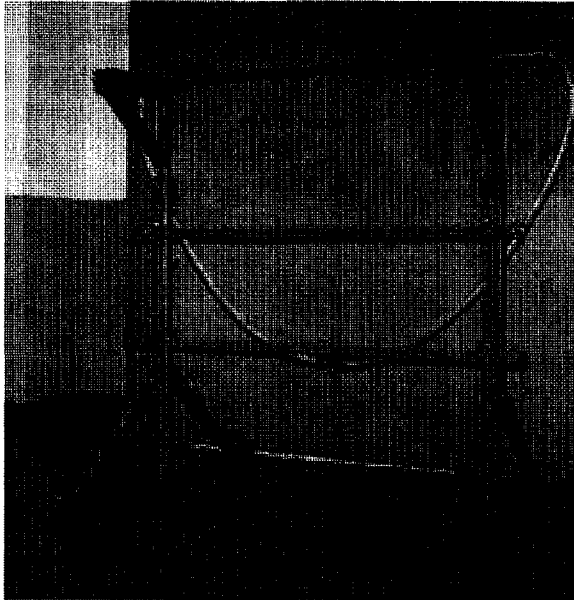


Fig. 2.3 PAR-Jet 노즐 실험 장치

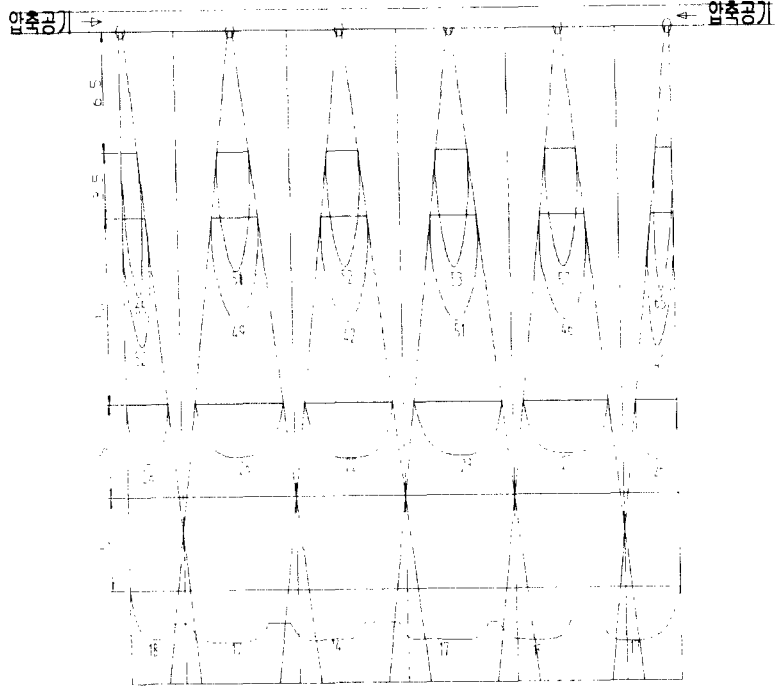


Fig. 2.4 PAR-Jet 노즐 속도 분포
(수직단위: cm, 수평단위: m/s)

- PAR-Jet 노즐의 최적 위치 선정 실험

날개 앞전 전방에 PAR-jet 노즐을 Fig. 2.5와 같이 설치하고, 9개 지점에서 지면판위 A, B, C, 점을 향해 jet를 분사시켜 최대양력을 얻는 위치를 선정하고자 한다.

지면판위 A, B, C, 점의 위치 X_p 와 jet의 위치(X_j , Y_j)는 시위길이로 무차원 시켰다.

(X_j , Y_j)를 선정하기 전에 jet 분사 방향을 확인하기 위하여 날개전방(A점), 앞전(B점) 날개밑(C점) 근방에 jet의 중심이 오도록 분사하여 유리한 방향을 선정하였다.

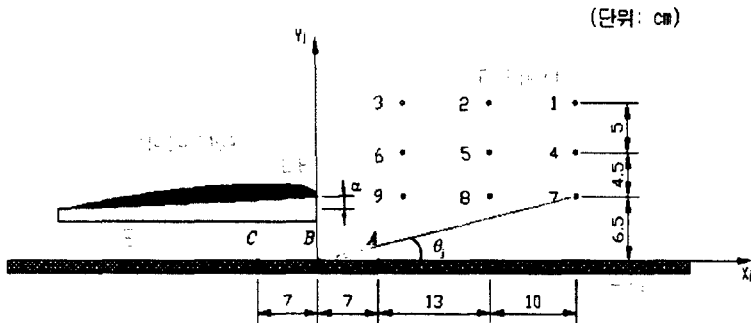


Fig. 2.5 PAR-Jet 노즐 위치 선정

Fig. 2.7은 지면판위 B,C점($X_f=0.0, -0.23$)에 분사한 경우이다. 이 그래프에서 양력은 Y_j 가 작은 값을 가질수록 큰 양력이 발생하는 경향을 보인다. Fig. 2.8은 지면판위 A,C점($X_f=0.23, -0.23$)에 대하여 Y_j 값이 같은 지점끼리 연결하였을 때 X_j 의 변화에 대한 공력하중 결과이다. 이 그래프에서 X_j 가 증가에 의한 변화는 작다. Fig.2.9은 지면판위 노즐 위치($X_p=0.23, 0, -0.23$) 변화에 대한 공력결과이다. 이 그래프에서 양력은 대체적으로 Y_j 가 큰 값($Y_j=0.503$)을 가질 때 X_f 에 대한 변화가 크고 이와는 약간 상반되게 Y_j 가 낮고 X_j 가 멀 경우($X_j = 0.94, Y_j = 0.217$)에서는 X_p 의 위치에 대한 변화는 작다.

결론적으로 PAR-Jet 노즐의 위치를 익형 기준으로 하여 지면에 가깝고 수평으로는 날개의 시위길이 만큼 앞전 전방에 위치시켜야 PAR효과가 증가함을 알 수 있다. Fig. 2.5에서 7번 위치가 최적의 위치임이 밝혀졌다. 앞전 전방 300mm이며 지면판과의 최소거리 Y_j 는 65mm이며 θ_j 는 13° 이다.

2.4 PAR에 의한 지면효과 실험

본 실험은 날개에 발생하는 공력하중을 측정하여 PAR의 유무에 따른 공력특성을 비교하기 위한 실험이다.

Fig. 2.6과 같이 공력하중을 측정하기 위하여 익형(NACA 6409)의 C/2위치에 3 분력계를 부착하였고 그 전방에 Fig.2.5의 7번 위치에 PAR-Jet 노즐을 설치하였다. 지면효과를 계측하기 위하여 지면판과 날개 후연 사이의폭(h/e) 0.033, ~ 0.133의 범위안에서 실험을 하였으며 날개의 받음각의 변화는 $0^\circ \sim 6^\circ$ 이다.

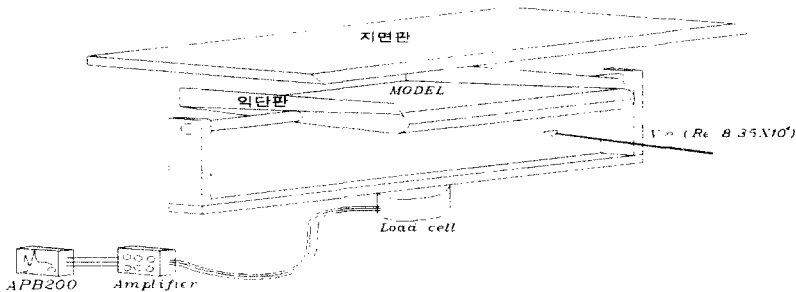


Fig. 2.6 공력하중 측정실험

양력, 항력, 피칭모멘트, 추력은 다음식으로 무차원화 하였다.

$$L = C_L \frac{1}{2} \rho V_\infty^2 S \text{ ----- (1)}$$

$$D = C_D \frac{1}{2} \rho V_\infty^2 S \text{ ----- (2)}$$

$$M = C_M \frac{1}{2} \rho V_\infty^2 S C \text{ ----- (3)}$$

$$T = C_T \frac{1}{2} \rho V_\infty^2 S^* \text{ ----- (4)}$$

- 양력

Fig. 2.10은 지면판과의 거리 변화에 따른 NO-PAR와 PAR에 대한 양력의 변화를 보여준다. NO-PAR의 경우 h/c 를 작게 하면 지면 효과에 의해 양력은 증가하지만 그것이 현저히 나타나는 것은 $h/c < 0.2$ 이다. PAR가 있을 때도 지면 효과에 따라 $h/c < 0.2$ 부근에서는 급격한 양력의 상승을 보이는데 NO-PAR의 경우보다 3-4배 정도로 증가한다. Fig. 2.11은 지면판과의 거리가 낮은 구간($h/c = 0.03 \sim 0.1$)에서 받음각에 따른 NO-PAR와 PAR의 양력 측정 값이다. 저고도에서는 받음각에 따라 NO-PAR와 PAR의 양력 차이가 크게 나타남을 알 수 있다. Fig. 2.12는 지면판과의 거리가 높은 구간에서($h/c = 0.1 \sim 1$) 받음각에 따른 NO-PAR와 PAR에 대한 양력 측정 값이다. 지면판과의 거리가 높을 때에는 NO-PAR와 PAR의 양력 차이가 작음을 알 수 있다.

- 항력

Fig. 2.13은 지면판과의 거리 변화에 따른 NO-PAR와 PAR의 경우에 대한 항력의 변화 폭을 보여주고 있다. PAR가 없을 때는 지면 효과에 의해 내리흐름(DOWN WASH)이 작게 되고 유도저항이 감소하게 되어 $h/c < 0.15$ 에서는 항력은 감소하며 받음각이 증가할수록 항력의 증가를 보여주고 있다. 또한 PAR 사용시 NO-PAR의 경우보다 급격한 항력의 증가를 볼 수 있으며 받음각이 증가할수록 항력의 증가를 볼 수 있다.

- 양항비

Fig. 2.14는 NACA6409 모델의 지면판과의 거리 변화에 따른 NO-PAR의 경우 양항비의 변화를 보여주고 있다. h/c 가 작은 값에서 큰 값으로 갈수록 양항비는 감소하고 있으며 $h/c < 0.15$ 에서는 작게 움직여도 양항비는 급증하고 있다. 이는 지면효과에 의해 양항비가 개선되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 2.15는 대표적인 예로 받음각이 4° 일 때 NO-PAR와 PAR에 대한 양항비를 보여주고 있다. PAR가 없을 때와 비교해보면 양항비는 상당히 나쁘고 h/c 가 증가함에 따라 양항비는 크게 감소한다. 즉 순항시에는 PAR를 사용하지 않음이 유리함을 알 수 있다.

- 피칭 모멘트

Fig. 2.16은 NACA 6409 모델의 지면판과의 거리 변화에 따른 NO-PAR와 PAR의 경우에 대한 모멘트 변화를 보여주고 있다.

PAR에 의한 모멘트는 NO-PAR일 때보다 그 특성이 변하며 PAR의 유무에 관계 없이 h/c 가 작은 값에서 큰 값으로 갈수록 모멘트는 증가한다.

또한 받음각이 증가하거나 h/c 가 증가할수록 (+)모멘트가 증가하여 압력 중심이 전방으로 이동함을 추측할 수 있다. 또한 그 변화폭이 $h/c < 0.15$ 부근에서 급증하게 변한다.

- 압력중심

Fig. 2.17은 NACA 6409 익형의 지면판의 거리 변화에 따른 NO-PAR와 PAR일 경우 압력중심의 변화를 보여주고 있다.

NO-PAR 경우에는 $1/2$ chord 근처에 머물지만 PAR의 경우에는 압력중심이 앞전으로 이

동하며 이러한 경향은 지면판과 거리가 멀어질수록 급격히 앞으로 이동된다.

이와같은 압력중심의 급격한 전방 이동은 PAR-WIG기가 수면에서 부상시 직후 심한 기수 올림 모멘트(Nose up)를 초래하여 WIG기의 세로운동 제어에 불리하기 때문에 안정성에 대해서 상세한 해석과 실험이 요구된다.

- 압력분포

Fig. 2.18 (a,b)은 h/c 의 변화에 따른 PAR효과에 의한 날개 윗면과 아랫면의 압력분포를 보여준다. 익단, 1/2스팬에서 h/c 가 작아질수록 날개 아랫면의 정압이 증가하는 것을 볼 수 있다. 특히 익단에서는 정압이, 1/2스팬보다 h/c 가 작을수록 정압의 증가가 두드러지는데, 이는 날개 밑면으로 들어오는 PAR-Jet류가 정적 Air cushion (Static aircushion)으로 변환되어 날개 밑면의 압력이 상승됨으로써 전체적인 양력이 상승하는 효과를 말한다.

Fig. 2.19(a,b)는 $h/c=0.03$ 일 때 PAR와 NO-PAR의 경우 날개의 압력분포를 보여준다. 익단, 1/2스팬 모두에서 PAR의 경우가 NO-PAR의 경우보다 상하면의 압력 차이가 큼을 볼 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 지면효과익기용 익형인 NACA 6409의 전방에 PAR-Jet 노즐을 설치하고 공력하중을 측정함으로써 PAR효과가 지면효과익의 공력하중에 미치는 영향에 대해 실험적으로 확인했으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) PAR-Jet 노즐을 설치하는데 있어 최대의 효과를 얻기 위해서는 PAR-Jet 노즐의 위치를 익형 기준으로 하여 지면에 가깝고 수평으로는 날개의 시위길이 만큼 앞전 전방에 위치시켜야 한다.
- 2) 날개가 수면 근처에 있을때($h/c < 0.2$)는 PAR사용시 양력은 PAR가 없을 때보다 3~4 배정도 증가했다. 이런 경향은 노즐추력이 큰만큼 현저하게 증가하였다.
- 3) PAR사용시 항력은 양력의 증가폭보다 훨씬 크게 증가한다.
- 4) 양항비는 PAR사용시 급격한 항력의 증가로 나빠진다. 따라서 지면효과익선이 순항시 PAR를 사용하지 않는 것이 절대적으로 유리함이 입증되었다.
- 5) 모멘트는 PAR 사용시 급격히 변한다. 이에 따라 압력중심은 날개의 앞전으로 이동하여 지면효과익선이 전복되는 현상이 예상된다. 따라서 지면효과익기의 세로 안정성에 대하여 새로운 연구가 요구 된다.
- 6) PAR사용시 익형주의 압력분포는 날개아랫면의 현저한 정압 증가를 보여준다.

참고문헌

- [1] Edwin van opstal."The wig page"(1997.9)
<http://www.wio.tudelf.nl/~twzio/edwin>
- [2] By Jarrett K. Huffman and Charlie M. Jackson, Jr "Investigation of the static lift capability of a low-aspect-ratio wing operating in a powered ground-effect mode", Langley Research Center November 1995
- [4] Nobuyuki Hirata, "Numerical Study on the Aerodynamic Characteristics of a Three-Dimensional Power-Augmented Ram Wing in Ground Effect" Journal of The Society of Naval Architects of Japan. Vol.177
- [5] Tetsuo NGAMATSU & Fumio KURE, "Experimental Study on Aerodynamic Characteristics of PAR-WIG)", J.Kansai Soc. N.A., Japan, NO.222,(1994.9)
- [6] 강환구, 김도형, 강동완, 박배진, 박윤경, 이상길, "해면효과를 받는 익형의 공력 특성에 관한 풍동실험 연구" 울산대 학사학위 논문(1997.12)
- [7] Hirata, N and Hino, T: "Investigation of a three-Dimensional power-Augmented Ram Wing in Ground Effect", AIAA Paper 97-0822.

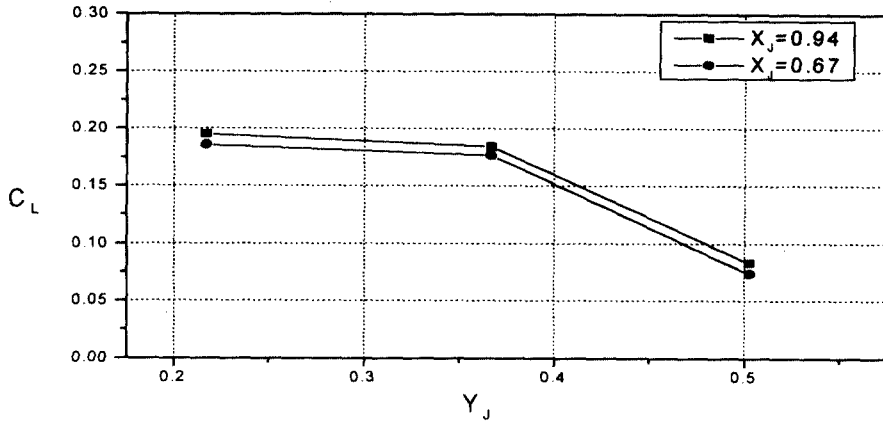


Fig. 2.7 Y_j 의 변화에 따른 양력계수

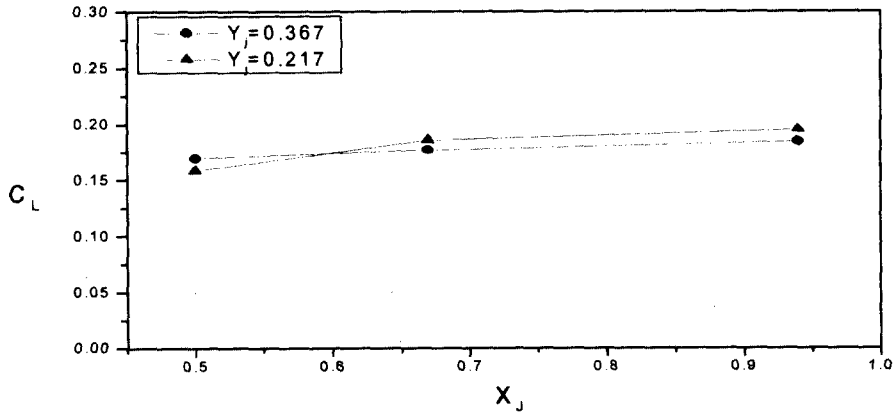


Fig. 2.8 X_j 의 변화에 따른 양력계수

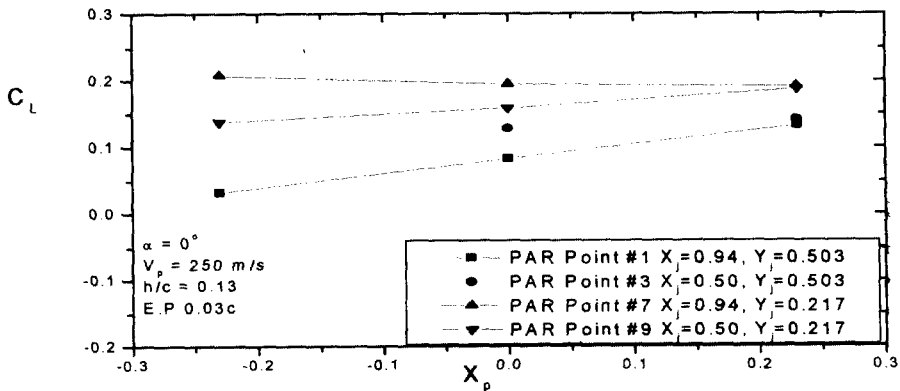


Fig. 2.9 X_p 의 변화에 따른 양력계수

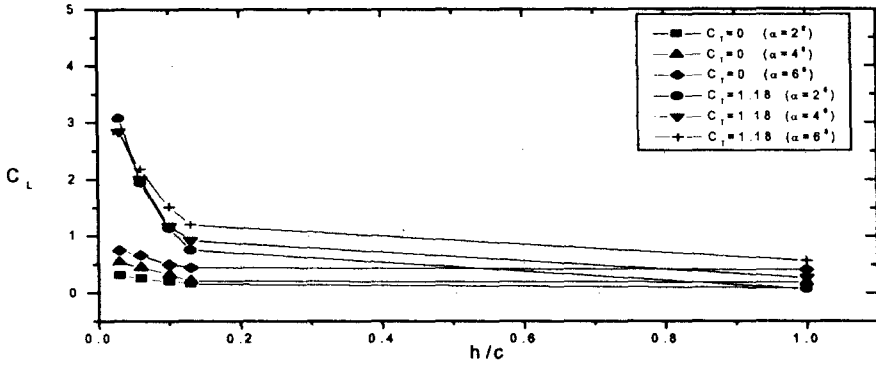


Fig. 2.10 h/c 에 따른 NO-PAR와 PAR의 C_L 변화($Re=8.35 \times 10^4$)

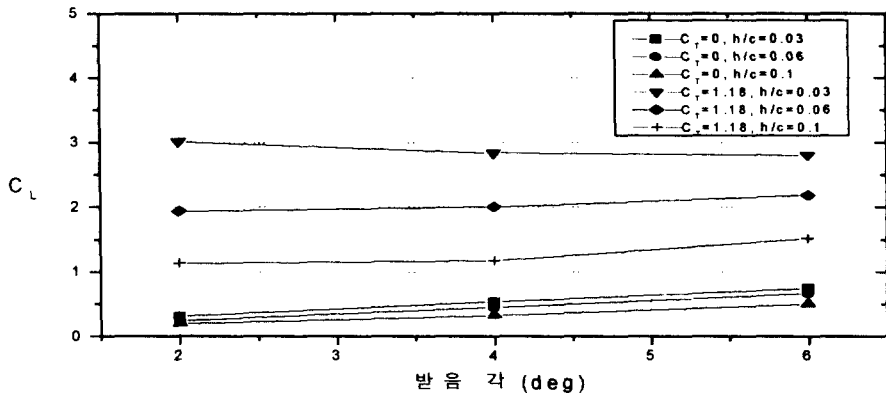


Fig. 2.11 받음각에 따른 NO-PAR와 PAR의 C_L 변화 ($Re=8.35 \times 10^4$)

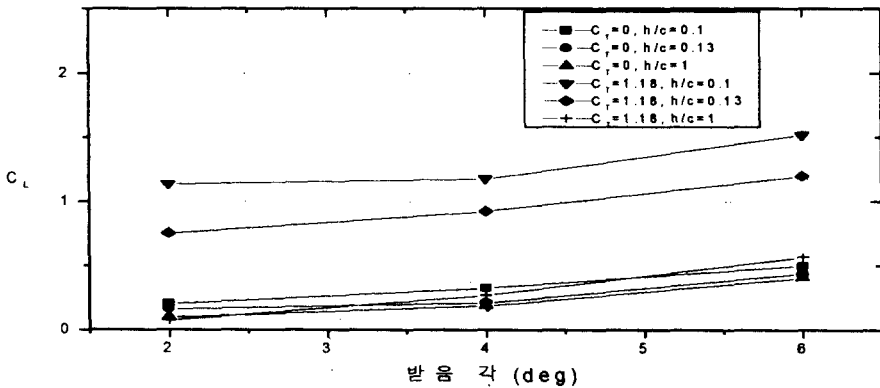


Fig.2.12 받음각에 따른 NO-PAR와 PAR의 C_L 변화 ($Re=8.35 \times 10^4$)

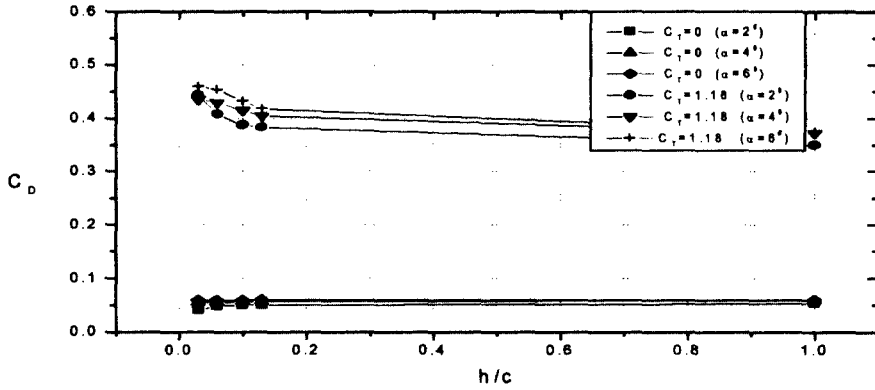


Fig. 2.13 h/c 에 따른 NO-PAR와 PAR에 대한 C_D 변화($Re=8.35 \times 10^4$)

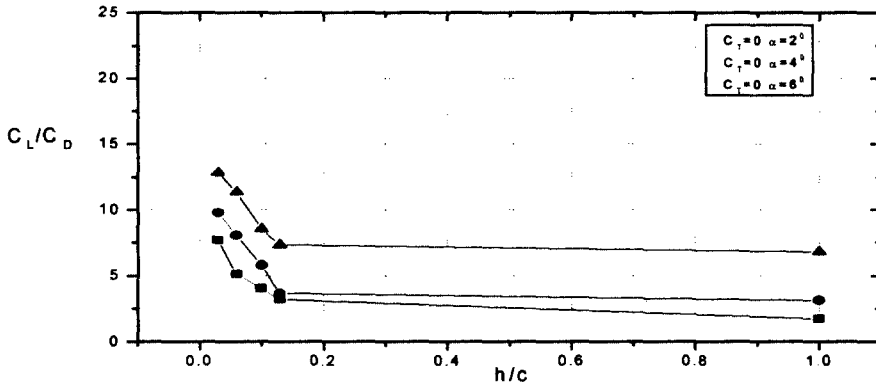


Fig. 2.14 h/c 에 따른 NO-PAR인 경우 C_L/C_D 변화

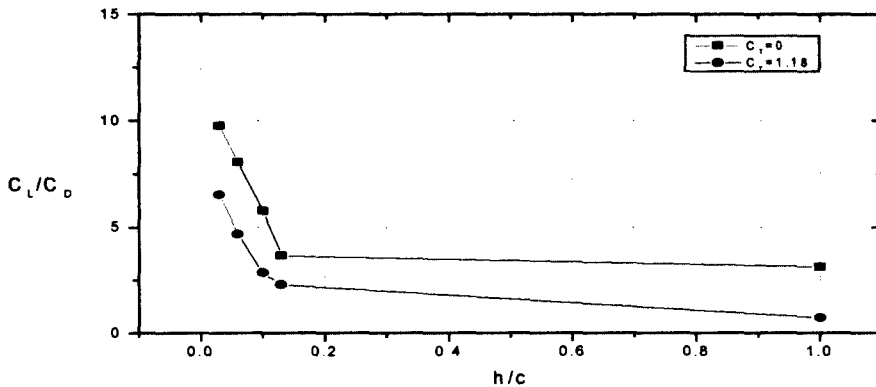


Fig. 2.15 h/c 에 따른 NO-PAR와 PAR의 경우 C_L/C_D 변화

($\alpha=4^\circ$, $Re=8.35 \times 10^4$)

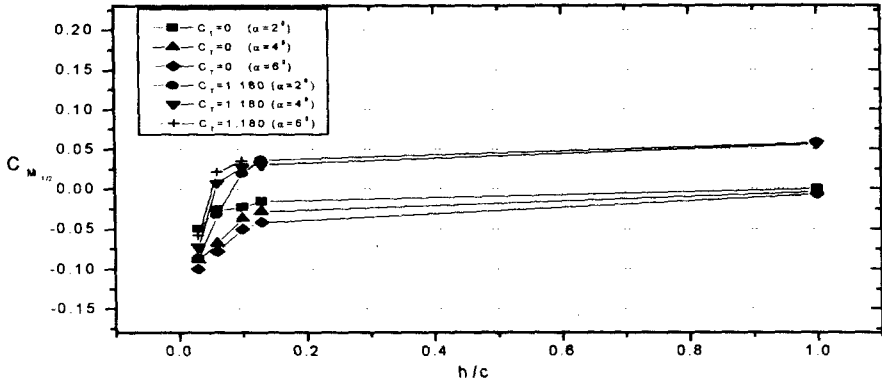


Fig. 2.16 h/c 에 따른 NO-PAR와 PAR의 $C_{M, 1/2}$ 변화 ($Re=8.35 \times 10^4$)

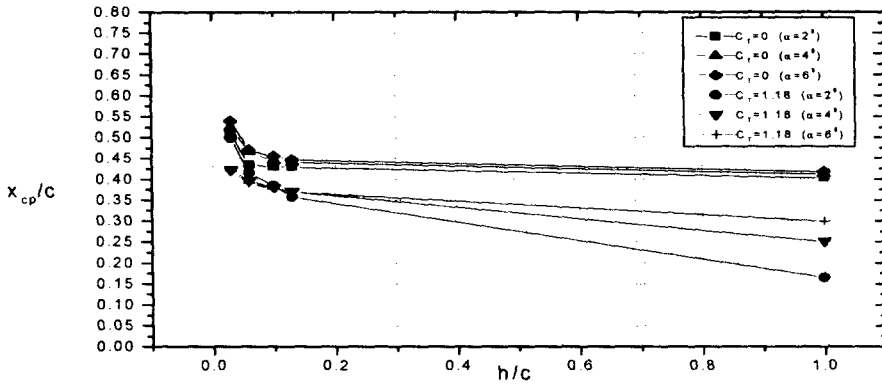


Fig. 2.17 h/c 에 따른 NO-PAR와 PAR인 경우 X_{cp} 변화 ($Re=8.35 \times 10^4$)

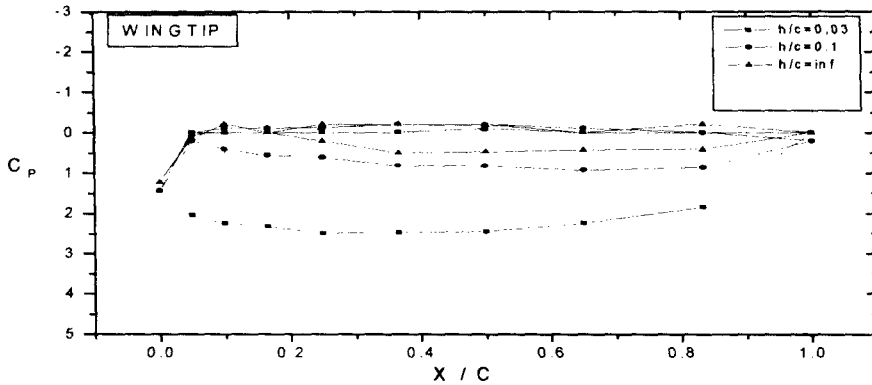


Fig 2.18-a h/c 의 높이에 대한 시위방향 압력분포
($\alpha = 2^\circ$, PAR, $C_T = 1.18$, $Re = 8.35 \times 10^4$)

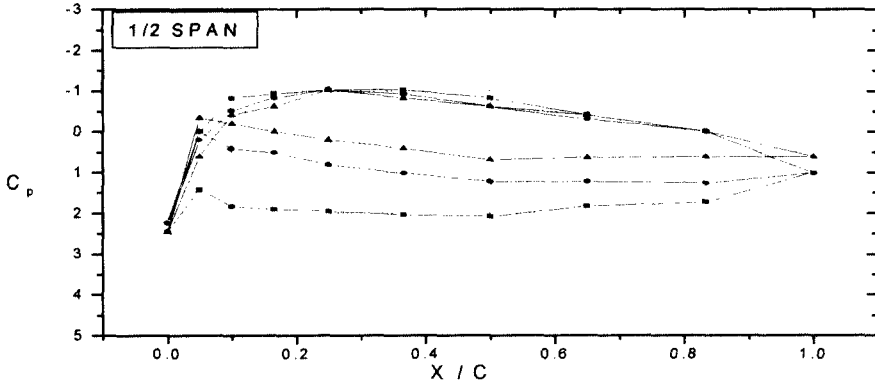


Fig 2.18-b h/c 의 높이에 대한 시위방향 압력분포
 ($\alpha = 2^\circ$, PAR, $C_T = 1.18$, $Re = 8.35 \times 10^4$)

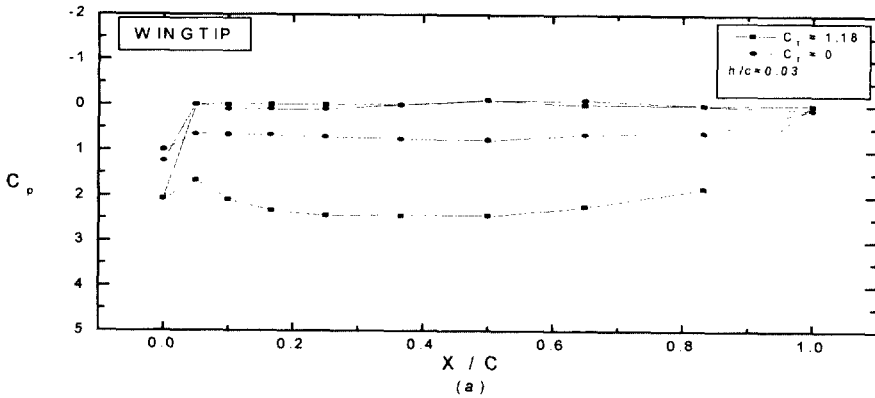


Fig 2.19-a PAR와 NO-PAR에 대한 시위방향 압력분포
 ($\alpha = 2^\circ$, $h/c=0.03$, $C_T = 1.18$, $Re = 8.35 \times 10^4$)

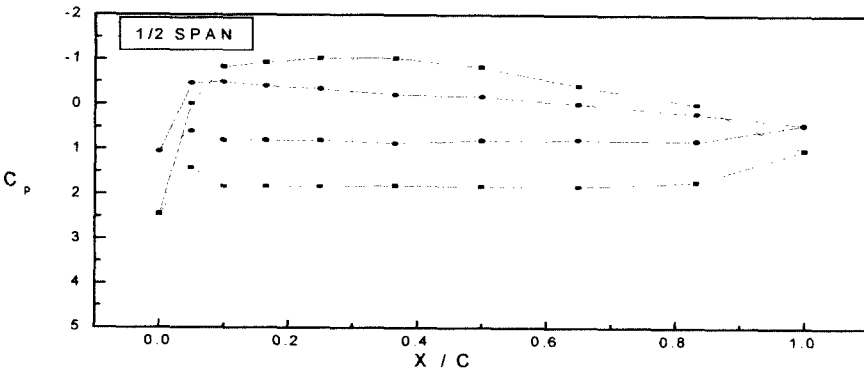


Fig 2.19-b PAR와 NO-PAR에 대한 시위방향 압력분포
 ($\alpha = 2^\circ$, $h/c=0.03$, $C_T = 1.18$, $Re = 8.35 \times 10^4$)