



***LESSON 15***  
***Supersonic Flow 1***

공군사관학교 항공우주공학과



# Lesson Outcomes

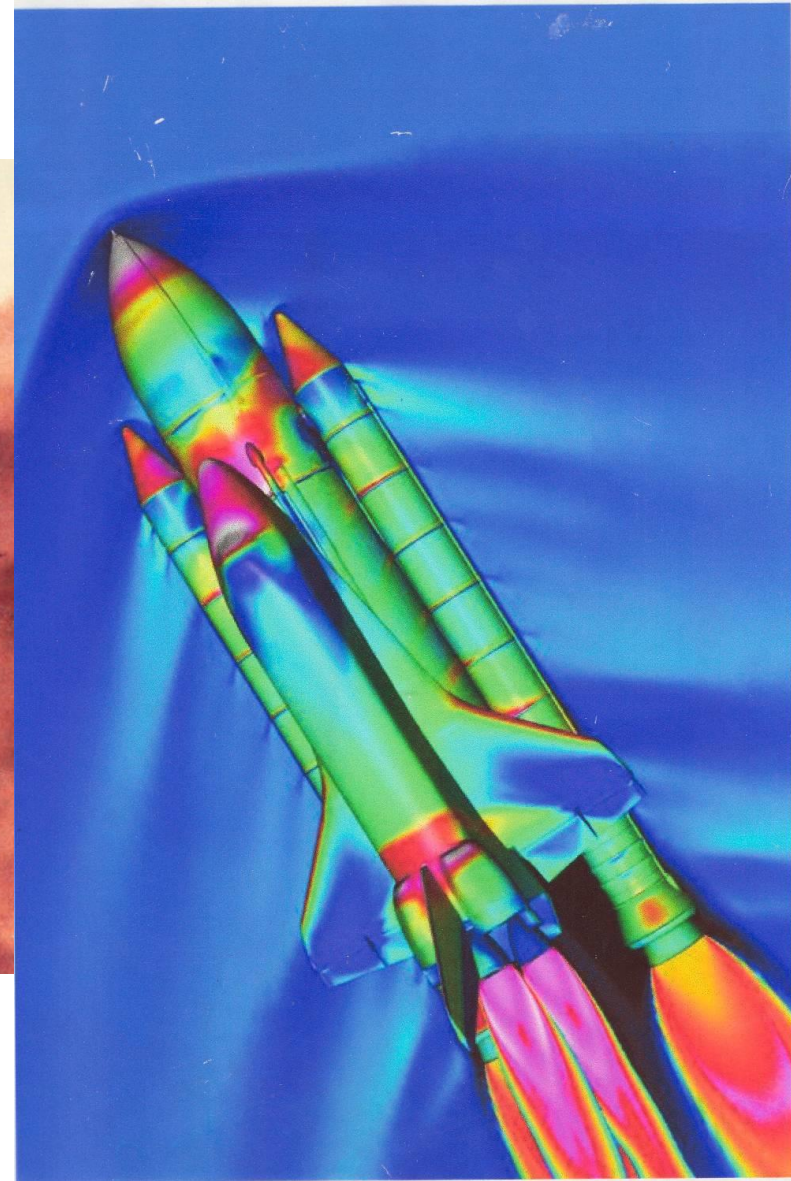
---

- Review
- 음속 / 마하수 정의
- Mach Wave vs Shock Wave
- 수직/경사 충격파(Normal, Oblique Shock)
- 팽창파 (Expansion Wave)
- 임계마하수 (Critical Mach Number)

# 복습문제

	Airfoil	Wing	Whole Aircraft
양력계수	$C_l$ from Airfoil Chart	$C_L = C_{L_\alpha} (\alpha - \alpha_{l=0})$ $C_{L_\alpha} = \frac{c_{l_\alpha}}{1 + \frac{57.3 c_{l_\alpha}}{\pi e AR}}$	Wing과 동일(가정)
항력계수	$C_d$ from Airfoil Chart	$C_D = c_d + \frac{C_L^2}{\pi e AR}$	$C_D = C_{D_0} + \frac{C_L^2}{\pi e_0 AR}$
양력/항력	$l = c_l qS$ $d = c_d qS$	$L = C_L qS$ $D = C_D qS$	$L = C_L qS$ $D = C_D qS$

# 동기부여 : what are these?



# 정의 : 음속

## 소리의 전달

→ 음원(disturbance) → 공기분자 충돌 → 압력파동(음파)

## 음속 (Speed of Sound)

- 어떤 물질에서의 압력파동(음파)의 전달속도

$$a = \sqrt{\gamma R T}$$

Speed of sound is a function of medium( $\gamma$ ) and temperature( $T$ ).

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = 1.4 \quad \text{Ratio of specific heats (1.4 for air).}$$

# 정의 : 마하수

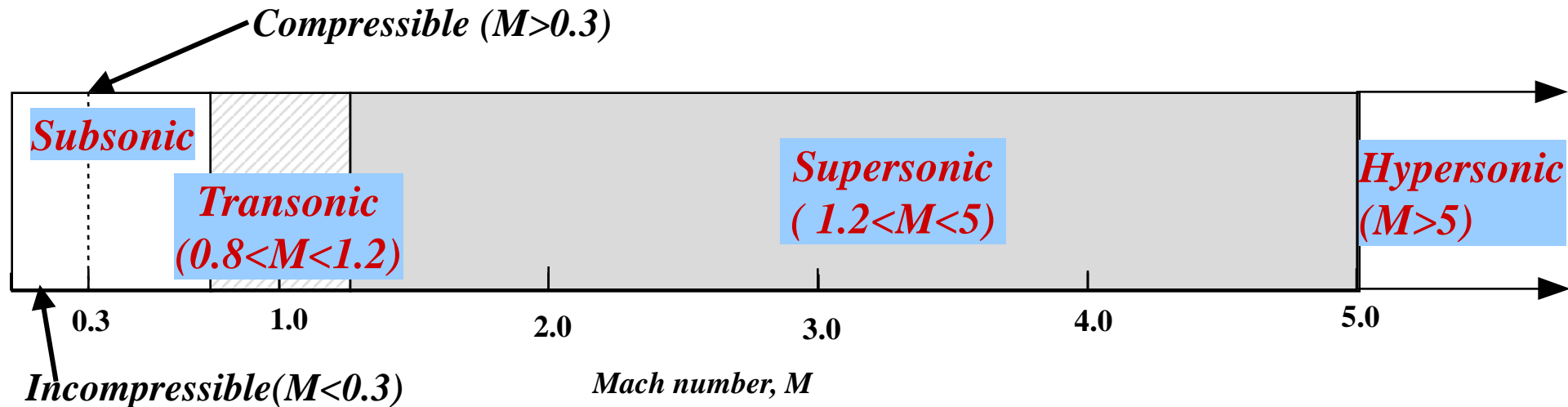
## 마하수 (Mach Number)

- 물체의 속도(유동의 속도)와 음속과의 비

$$M = \frac{V}{a}$$

Memorize

## Flight Regimes



# 음속 문제

- ❖ F-15 전투기가 활주로에서 이륙하고 있다. 이 때 온도는  $75^{\circ}$  F이다. 음속을 knots단위로 계산하시오.

$$a = \sqrt{\gamma RT} = \sqrt{(1.4)(1716)(535)} = 1134 \text{ ft / sec} = 671 \text{ knots}$$

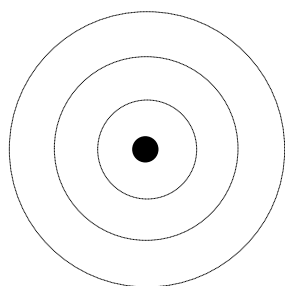
- ❖ 이륙한 지 한 시간 후 F-15는 한랭 전선의 영향을 받고 있는 산봉우리 위를 비행하고 있다. 이 때 온도는  $10^{\circ}$  F이다. 음속을 계산하시오.

$$a = \sqrt{\gamma RT} = \sqrt{(1.4)(1716)(470)} = 1063 \text{ ft / sec} = 629 \text{ knots}$$

# 마하파 (Mach Wave)

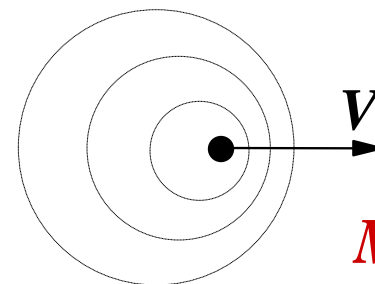
## ❖ 정의

- 매우 미세한 요란에 의한 전파(음파와 동일)



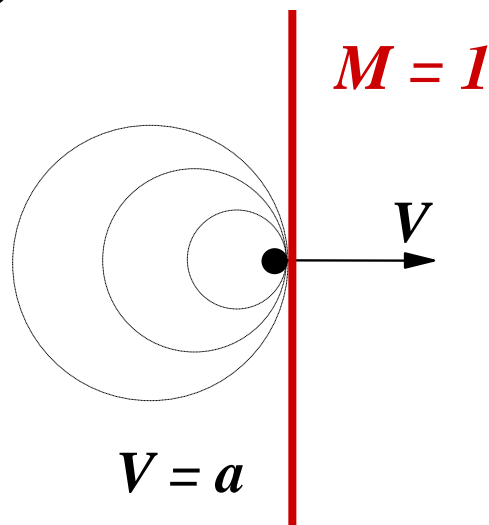
$$M = 0$$

$$V = 0$$



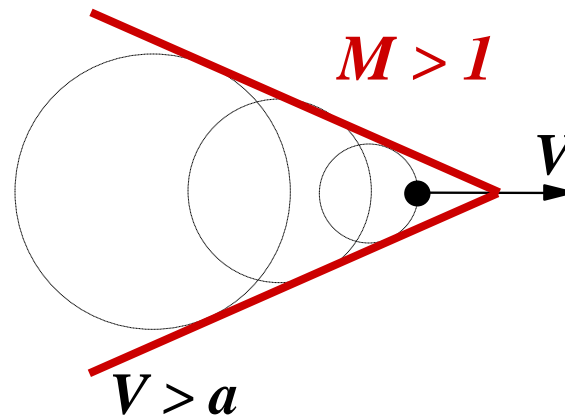
$$M < 1$$

$$V < a$$



$$M = 1$$

$$V = a$$



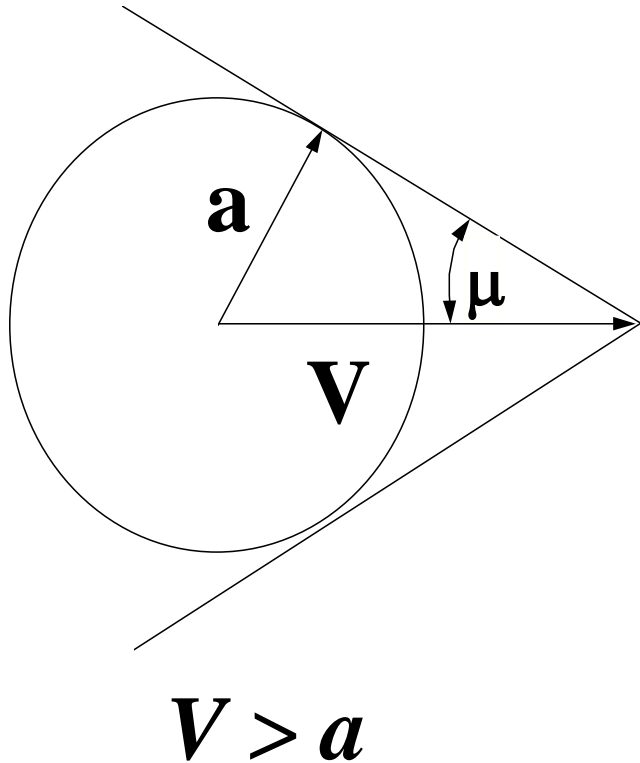
$$M > 1$$

$$V > a$$

# 마하각 (Mach Angle)

## ❖ 정의

- 마하수가 1 이상일 때 마하파가 요란의 진행방향과 이루는 각



$$\sin \mu = \frac{a}{V} = \frac{1}{M}$$

$$M = \frac{1}{\sin \mu}$$

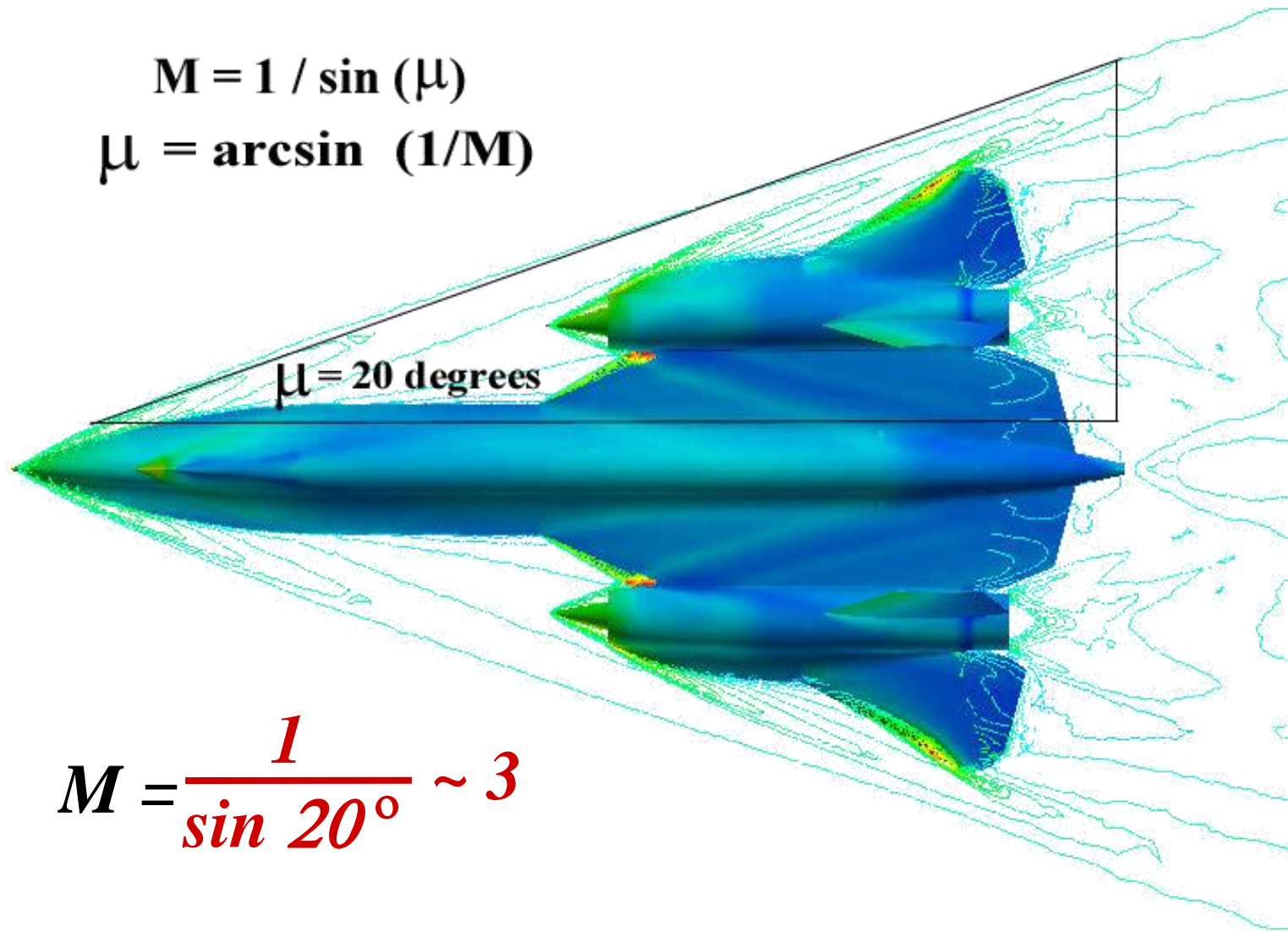
Mach Wave

# 알아 맞춰 보세요!

❖ SR-71은 지금 얼마나 빨리 비행하고 있을까요?

$$M = 1 / \sin (\mu)$$

$$\mu = \arcsin (1/M)$$



$$M = \frac{1}{\sin 20^\circ} \sim 3$$

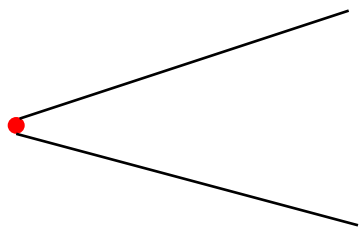
# 마하파 vs. 충격파 (Shock Wave)

## ❖ 마하파

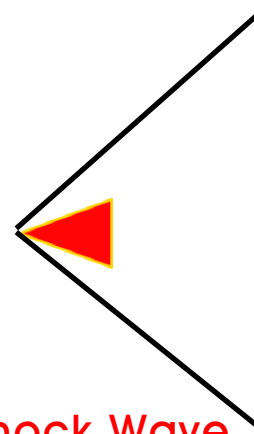
- 매우 작은 요란을 일으키는 압력파
- 요란은 아주 미세한 물체에 의해 발생

## ❖ 충격파

- 강한 압력파
- 요란은 유한한 체적을 가진 물체에 의해 발생
- 물체 각 점에서의 요란(마하파)이 중첩되어 강한 압력파 형성



Mach Wave

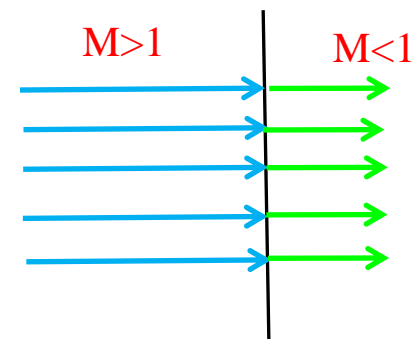


Shock Wave

# 충격파의 종류 : 수직 vs. 경사 충격파

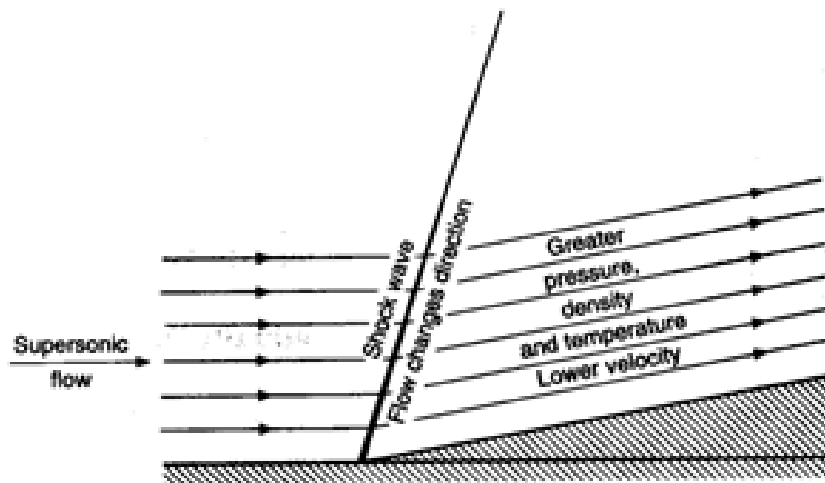
## ❖ 수직 충격파 (Normal Shock Wave)

- 강한 충격파
- 큰 조파항력 발생
- 유동 방향은 변화하지 않음
- 유동속도는 충격파를 지나 아음속이 됨



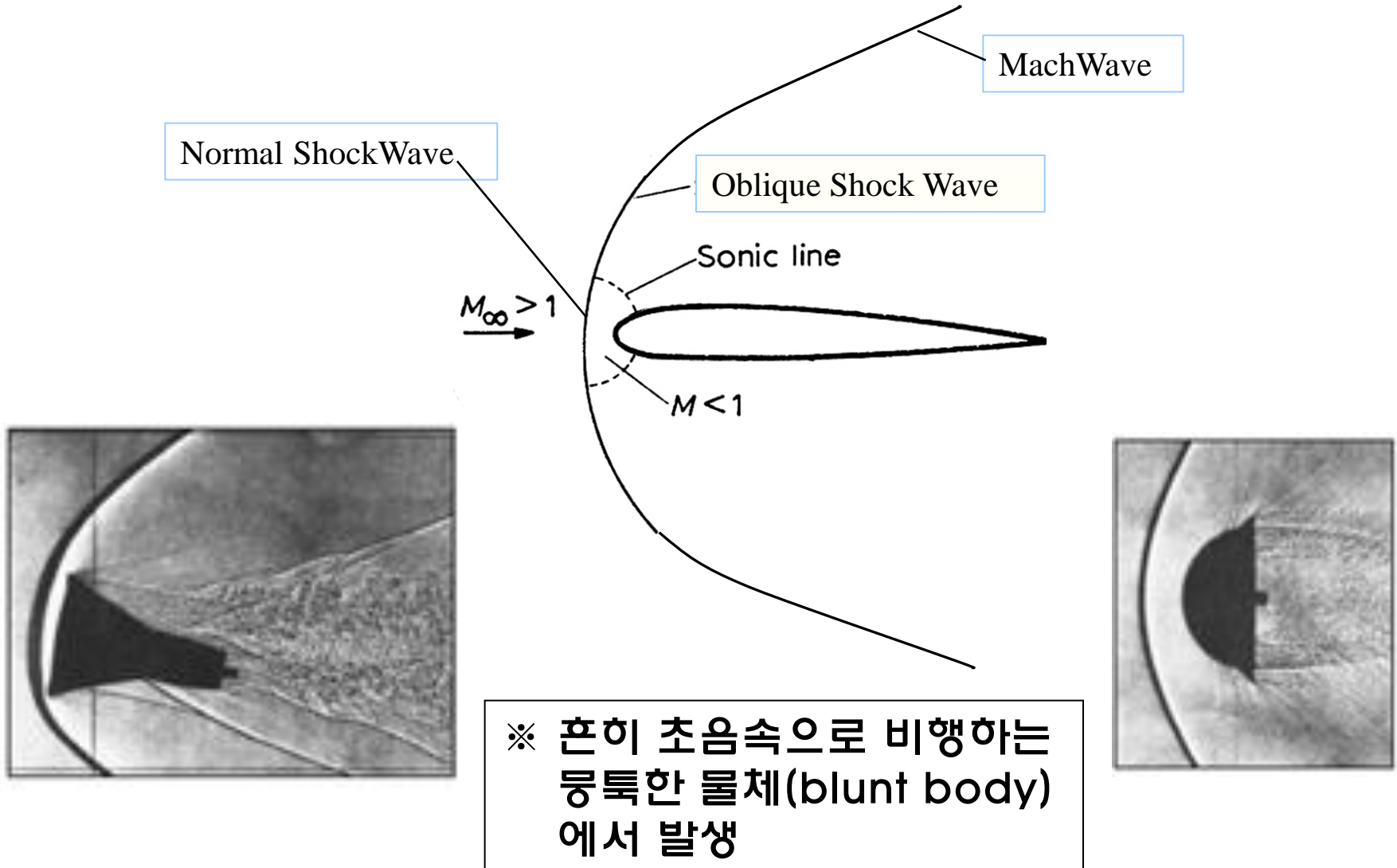
## ❖ 경사 충격파 (Oblique Shock Wave)

- 상대적으로 약한 충격파
- 상대적으로 작은 조파항력
- 유동방향은 불연속적으로 변화
- 유동속도는 일반적으로 충격파를 지나도 초음속 유지

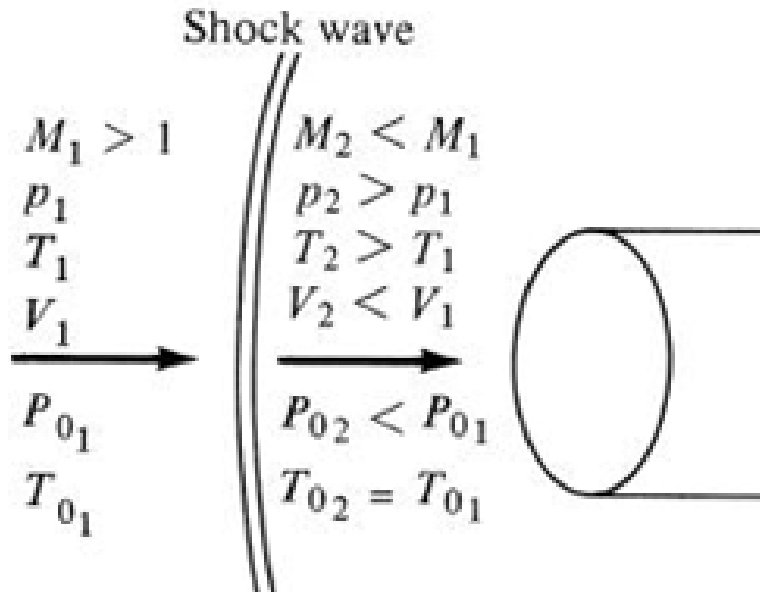


# 충격파의 종류 : 활모양 충격파 (Bow Shock Wave)

❖ 수직 충격파, 경사 충격파, 마하파 모두 발생하는 유동



# 충격파 전후의 물리적 특성 변화



- |       |       |   |                   |
|-------|-------|---|-------------------|
| ① 마하수 | $M$   | ↓ | $M_1 > M_2$       |
| ② 정압  | $p$   | ↑ | $p_1 < p_2$       |
| ③ 온도  | $T$   | ↑ | $T_1 < T_2$       |
| ④ 속도  | $V$   | ↓ | $V_1 > V_2$       |
| ⑤ 전압  | $p_0$ | ↓ | $p_{01} > p_{02}$ |

※ 충격파를 지나서 **전체 압력이 감소하는 것은 에너지의 손실을 의미 → 항력 Source (조파항력)**

# 조파항력 (wave drag)

## Wave drag

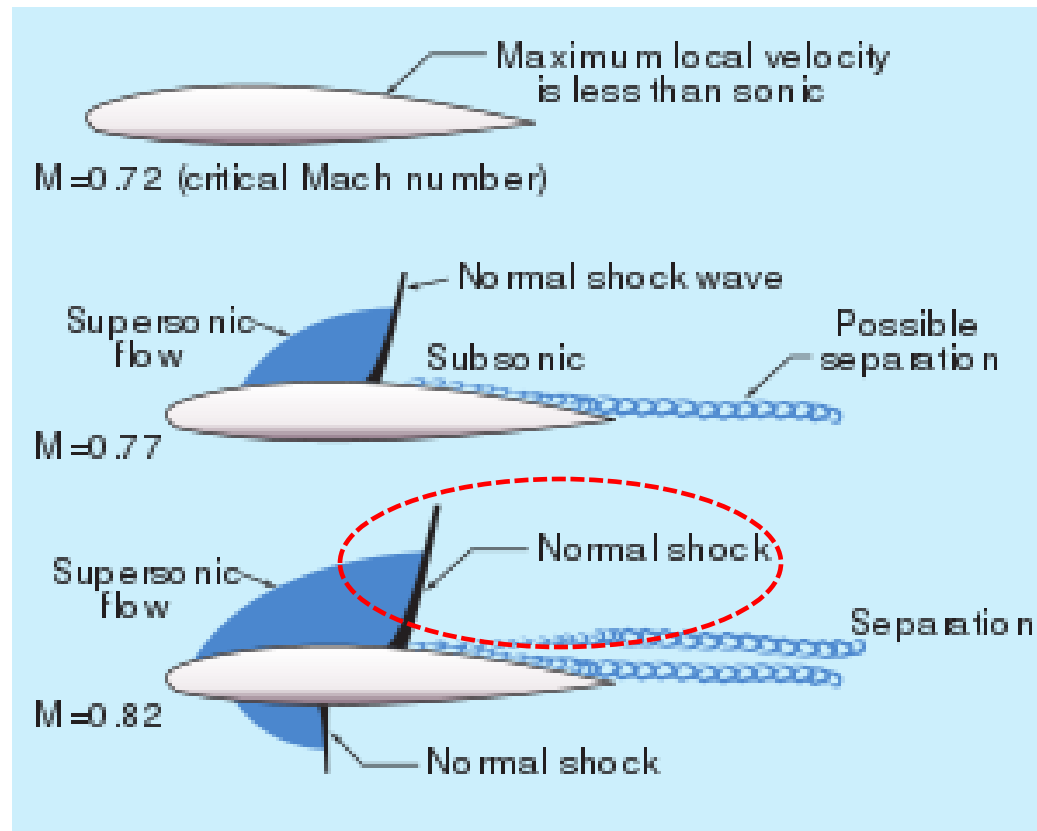
- 충격파 발생에 따른 항력
- 충격파 강도가 강할수록 충격파 전후 더 큰 전압 감소
  - 충격파 강도가 강할수록 조파항력 증가
  - 수직충격파 조파항력 > 경사충격파 조파항력

- ※ 초음속 항공기 형상이 날카롭고 뾰족해야 하는 이유
  - 경사충격파 발생 유도
  - 조파항력 감소 효과

# 에어포일 주위의 충격파 생성

## ❖ 수직 충격파의 형성

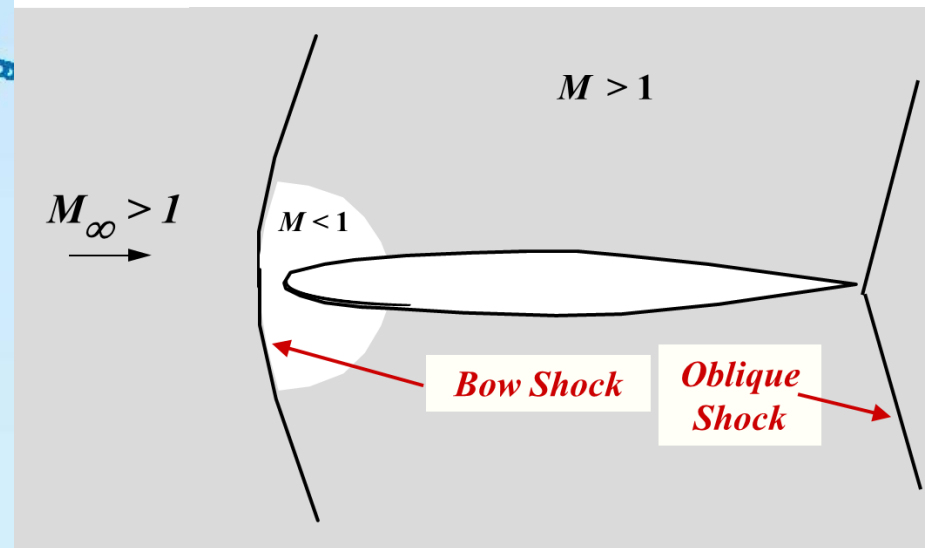
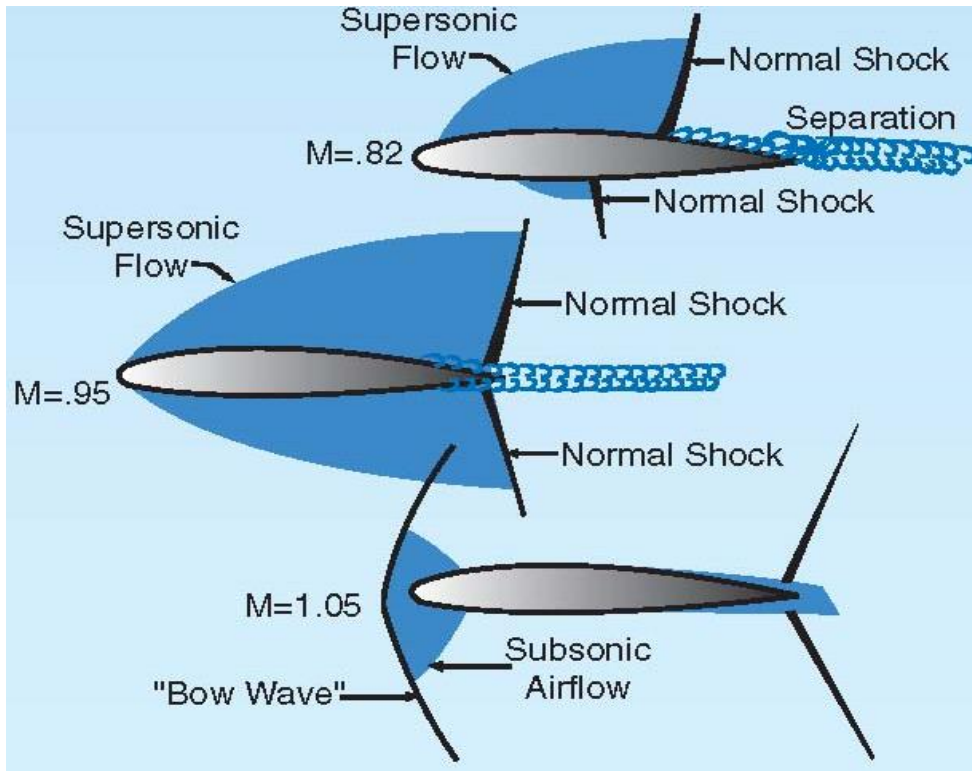
- 마하수가 증가함에 따라 날개 위/아래에서 수직 충격파 전체 항공기의 경우 날개, 동체, 다른 부분에도 발생하기 시작
- 마하수가 증가할 수록 충격파의 위치가 뒤쪽으로 이동



# 에어포일 주위의 충격파 생성

## ❖ 활형 충격파 (Bow Shock) 의 형성

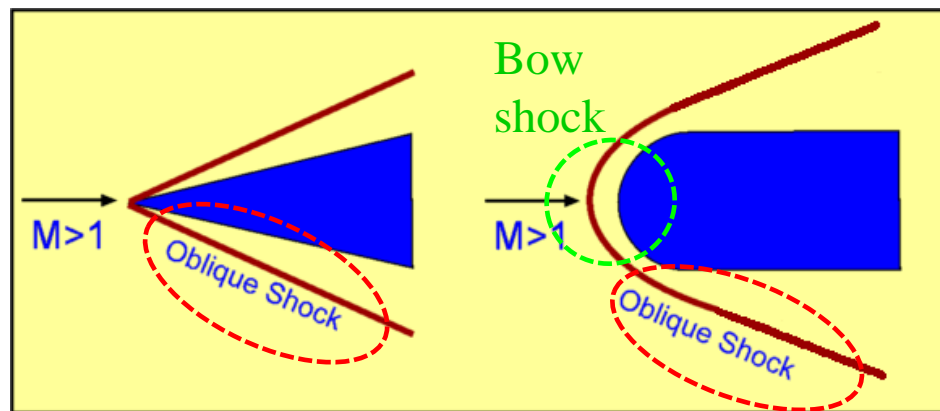
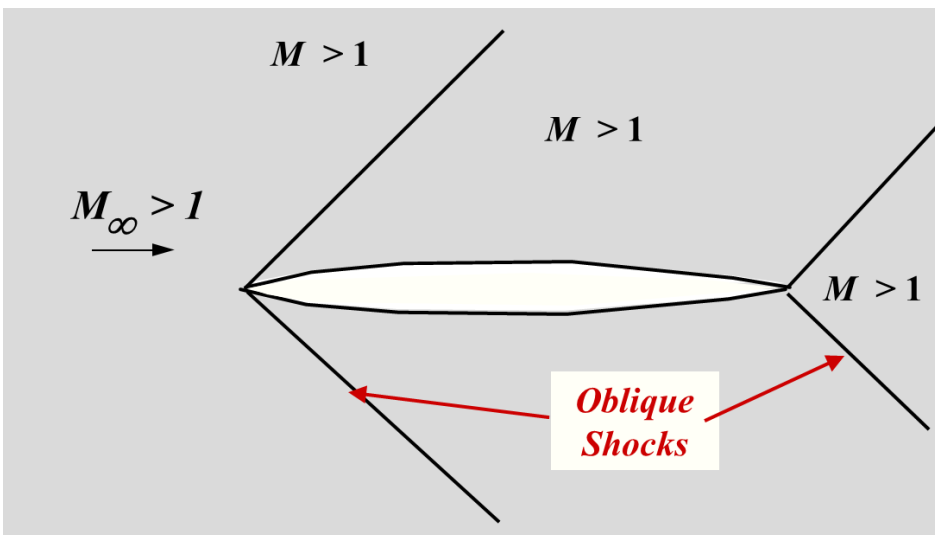
- 마하수가 1 이상이 되면 활형 충격파가 에어포일 앞전에 형성
- 에어포일 뒷전에는 경사충격파가 발생



# 에어포일 주위의 충격파 생성

## ❖ 경사 충격파의 형성

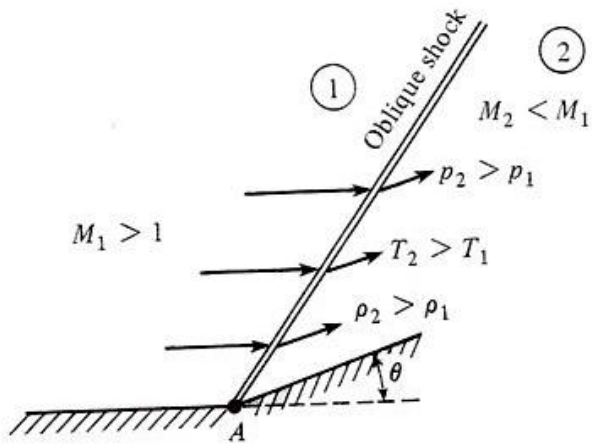
- 앞전이 뾰족한 에어포일의 경우 자유류 마하수가 1보다 클 경우 앞전 및 뒷전에서 경사 충격파 생성
- 모든 영역에서 초음속 유동



뾰족한 앞전

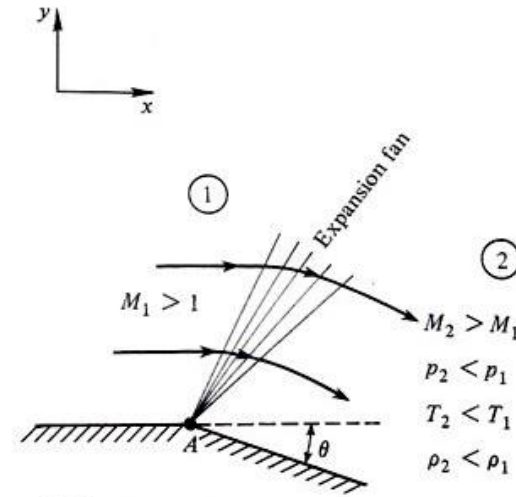
뭉뚝한 앞전

# 충격파 vs. 팽창파(expansion wave)



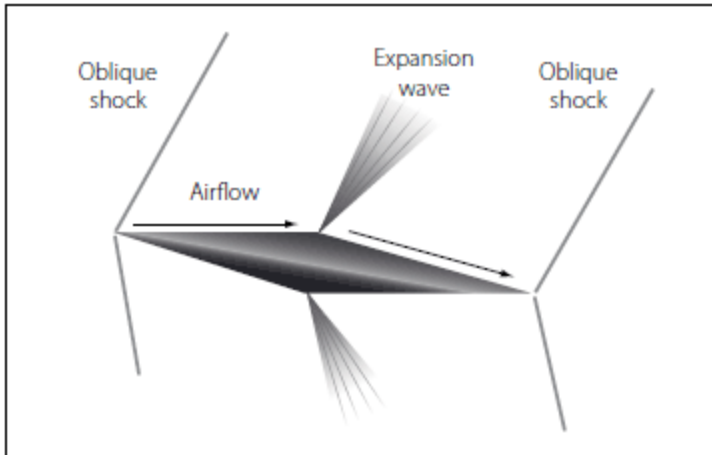
(a) Concave corner

**충격파 : 마하파 중첩**



(b) Convex corner

**팽창파 : 마하파 확산**



※ 팽창파 전후의 유동 변화

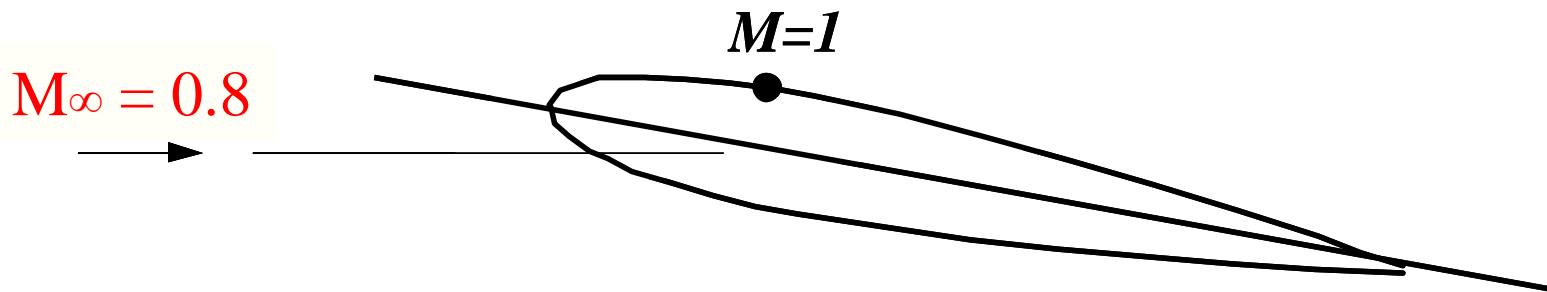
- 속도 증가
- 압력 감소
- 온도 감소

→ 충격파와 반대 경향

# 임계 마하수 (Critical Mach Number)

## ❖ 정의

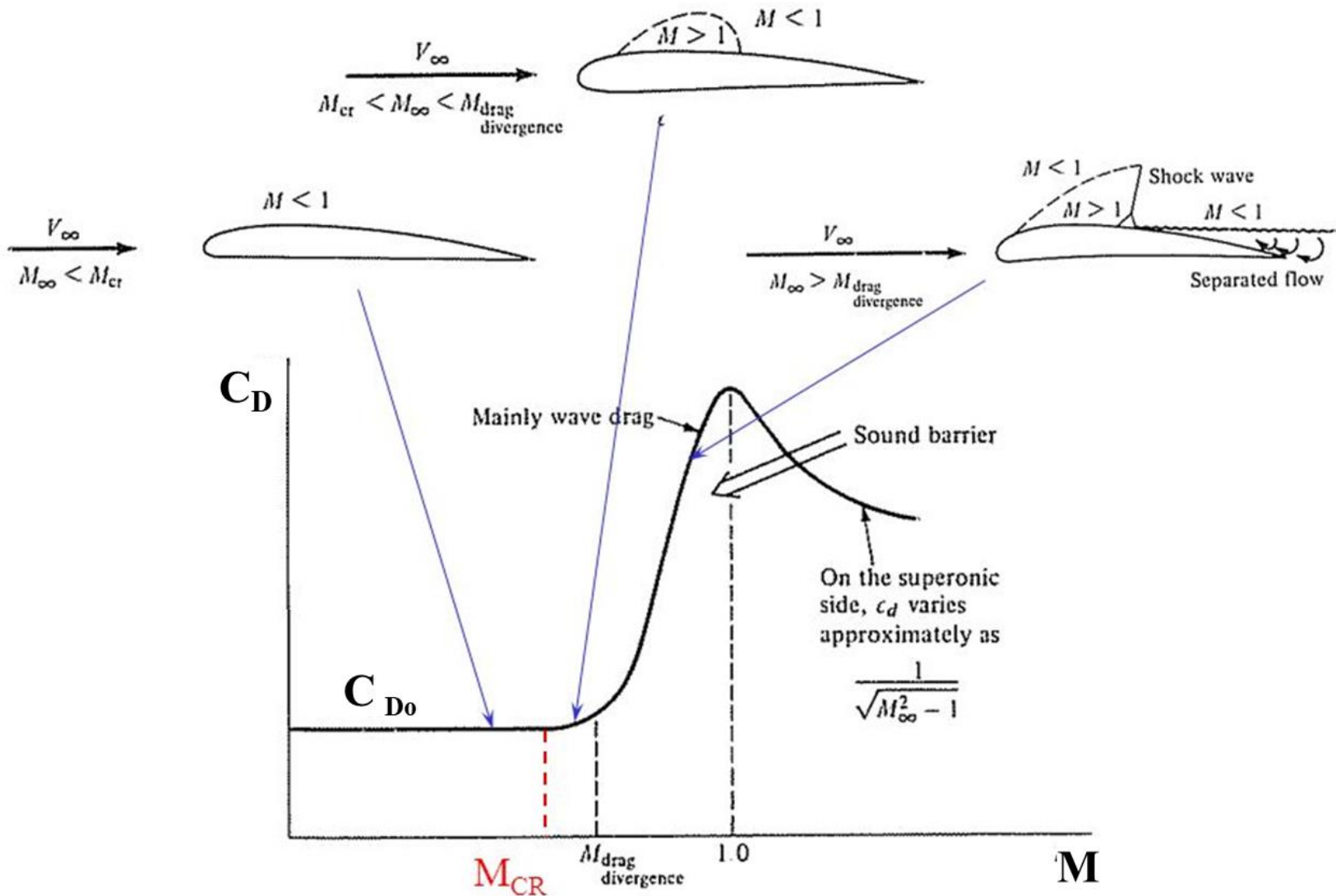
- 비행하는 항공기의 마하수를 계속 증가시킬 경우 날개위의 어떤 한 점에서 마하수가 1이 처음으로 되었을 경우의 **자유류 마하수**



## ❖ 중요성

- 임계마하수 이후 날개에 초음속영역 발생  
→ 수직충격파 발생 → 조파항력 발생 → 항공기 전체 항력 급증
- 임계마하수가 높은 항공기일수록 조파항력의 증가없이 고속 비행 가능 (고속 비행 효율성 증가)**

# 마하수에 따른 항력변화



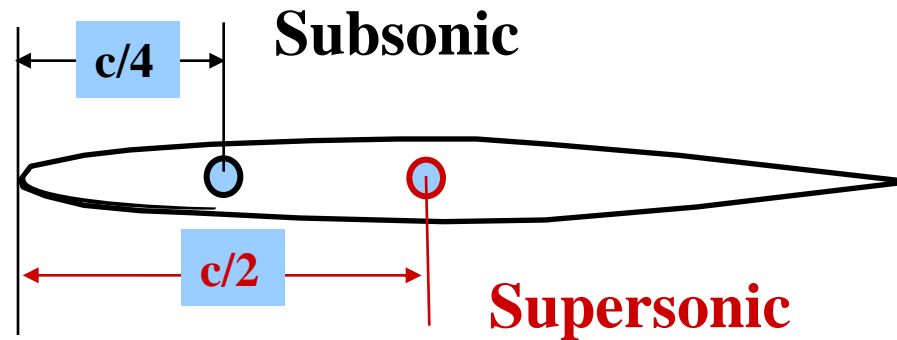
# Critical Mach Number : examples

---

<u>Aircraft</u>		<u>Critical Mach Number</u>
Airbus 330		0.86
747		0.855
777		0.86
C-5		0.75
C-17	Supercritical Wing	0.875
C-141		0.767
KC-135		0.93
KC-10		0.82
B-47		0.85
B-52H		0.91

# 마하수에 따른 공력중심 변화(optional)

- 항공기가 초음속으로 진입하면서 공력중심 위치가  $c/4$ 에서(아음속)  $c/2$  위치로(초음속) 후퇴됨



- 공력중심의 후방이동은 초음속 비행 진입 시 강한 nose down 현상 유발 → Mack Tuck  
→ 위험 비행 상황 초래 가능

# Condensation Clouds (optional)



날개 주위 유동가속  
→ 압력 감소  
→ 온도 감소  
→ Condensation