

# FSI 기법을 이용한 와류진동 해석

## Analysis of Vortex Vibration by Using the FSI Technique

김대근\*, 김성만\*\*

Dae Geun Kim, Sung Man Kim

### 요 지

케이블 교량에서 발생하는 사장케이블의 진동현상에 대한 현상학적 특성을 명확히 이해해야, 사장케이블의 적합한 제진설계가 가능하다. 본 연구에서는 유체의 흐름과 구조물의 진동을 동적으로 연계하여 해석하기 위하여, ADINA의 CFD 및 Structure 코드를 동적으로 연계하는 FSI(Fluid Flow with Structure Interaction) 기법을 이용하였다. 바람으로 인해 이중원형실린더의 풍상측과 풍하측 실린더에서는 와류가 방출되면서 외력이 작용하게 되며, 이러한 공기력은 풍하측 실린더의 고유진동 운동과 함께 와류진동현상을 유발한다. 본 연구에서는 풍하측 실린더의 와류진동 현상의 해석에 주안점을 두었다. 본 연구에서는 흐름의 레이놀즈수와 이중원형실린더에 대한 바람의 입사각을 변화시키며 풍하측 실린더에서 발생하는 와류진동의 크기를 분석하였다. 본 연구결과, 유입풍속 및 바람의 입사각에 따라 이중원형실린더에서 발생하는 일반적인 와류방출현상과 풍하측 실린더에 작용하는 공기력 및 변위양상을 예측할 수 있었다. 특히, 바람의 입사각이 15°인 경우에는 풍하측 실린더에서 방출되는 와류로 인해 풍하측 실린더에는 비대칭의 공기력이 작용하며, 이는 풍하측 실린더가 2사분면에서 4사분면 방향으로 진동하는 원인이 되는 것으로 판단된다.

**핵심용어 : 와류진동, ADINA, FSI, 이중원형실린더, 고유진동**

### 1. 서 론

이중원형실린더와 같은 구조형식은 해양구조물, 열교환기 및 사장교의 평행케이블과 같은 구조물에 널리 이용되고 있다. 특히, 사장케이블의 진동은 우수와 기류에 의해 와류진동, 풍우진동, 웨이크갤로핑(wake galloping)의 형태로 발현되며 이로 인해 케이블의 사용성과 내구성이 저하된다(이명재 등, 2008). 케이블교량에서 발생하는 이와 같은 진동현상에 대한 물리적인 특성에 대한 이해가 선행되어야 사장케이블의 적합한 제진설계가 가능하다. 와류진동은 흐름속의 구조물 후면에서 방출되는 와류에 의해 기류의 직각방향으로 구조물에 작용하는 하중에 의해 발생한다. 일반적으로 와류진동은 기류의 에너지가 작은 영역에서 발생하므로 위험하지는 않은 것으로 보고되고 있으나, 케이블 정착부의 2차응력에 의한 내구성 저하 방지를 위한 제어가 필요한 것으로 알려져 있다. 풍우진동은 케이블 표면에 형성된 물줄기에 의한 단면형상 변화로 발생하는 진동현상으로 웨이크갤로핑 현상과 유사한 거동을 보이나, 기류가 강해지면서 케이블 표면의 물줄기가 이탈되므로 발산하지는 않는 것으로 알려져 있다. 웨이크갤로핑은 케이블의 공탄성(aeroelastic) 불안정 현상으로, 중강풍속에서 발생할 확률이 높은 것으로 알려져 있으며 기류에 직각방향으로 발생하는 발산진동이다(이명재 등, 2008; Simiu and Scanlan, 1996).

와류진동에 관한 연구는 주로 풍동실험(wind tunnel test)을 통한 연구가 대부분이다. Sumner 등(2007)은 직경이 같은 이중원형실린더의 간격과 바람의 입사각을 변화시키면서 실린더 후면에서 발생하는 와류방출현상을 실험하였다(그림 1 참조). 이들은 풍상측과 풍하측의 실린더에서 발생하는 와류의 주기성에 관심을 두고 실험을 수행하였는데, 실린더간 간격이 좁은 경우( $L/D < 1.5$ )에는 두 개가 실린더가 하나의 구조물처럼 거동하

\* 정희원 • 목포대학교 공과대학 건설공학부 토목공학전공 조교수 • E-mail : kdg05@mokpo.ac.kr

\*\* 목포대학교 공과대학 건설공학부 토목공학전공 석사과정 • E-mail : sisa59@hanmail.net

여 하나의 주파수를 가지는 와류가 방출되며, 실린더간 간격이 중간인 경우( $1.5 \leq L/D < 2.5$ )에는 풍상측과 풍하측 실린더의 상호 간섭으로 인해 실린더별로 다른 주파수의 와류가 방출되며, 실린더간 간격이 충분히 먼 경우( $L/D > 2.5$ )에는 각각의 실린더간 간섭이 없기 때문에 단독 원형실린더에서의 와류방출 주파수와 거의 동일한 결과를 보였다.

Liu 등(2008)은 다양한 직경을 가지는 실린더를 일렬로 배열하고 각 실린더에 작용하는 평균항력과 평균양력을 풍동실험을 통해 산정하였다. 이들의 연구에서 풍상측과 풍하측의 항력계수가 급변하는 한계간격(critical spacing)으로  $L/D = 3.5$ 를 제안하였다. 한계간격 이내에서는 풍하측의 항력이 거의 0이거나 심지어 음의 항력을 보이나, 한계간격 이상에서는 급격히 항력이 증가하는 양상을

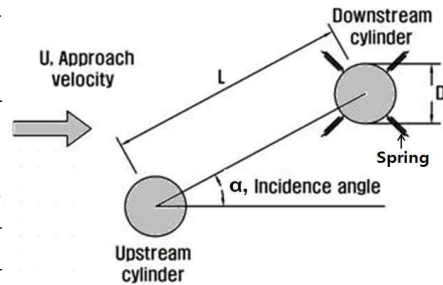


그림 1. 이중원형실린더의 개념도

보인다. Tokoro 등(2000)은 평행케이블에서의 웨이크갤로핑 현상을 풍동실험을 통해 재현하였다. 이들의 실험에서  $L/D = 4.3$ , 바람의 입사각( $\alpha$ )은  $15^\circ$ 인 경우에 케이블의 진동이 가장 크게 발생하는 것으로 나타났다.

최근 CFD 해석을 이용하여 교량 보강거더의 정, 동적 해석이 이루어지고 있으며, 이를 통해 정, 동적공기력의 물리적 발생 메커니즘을 규명하는데 효과적으로 이용되고 있는 것에 반해, 이중원형실린더에서의 와류진동에 관한 연구는 풍동실험을 통해서 주로 이루어지고 있으며, CFD 해석을 통한 접근은 미미한 실정이다. 본 연구에서는 Tokoro 등(2000)의 풍동실험결과를 참조하여 이중원형실린더간의 거리와 바람의 입사각을 결정하였으며, 상용코드인 ADINA의 FSI(Fluid Flow with Structure Interaction)기법을 이용하여 풍하측 실린더에서 발생하는 와류진동의 크기를 분석하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 해석모형

본 연구에서는 ADINA(ver. 8.4)모형의 FSI기법을 이용하였다. 유체의 흐름을 지배하는 방정식은 직교좌표계에서 비압축성유체의 흐름을 해석하기 위한 시간평균 Navier-Stokes 방정식(레이놀즈방정식)이다. 난류모형은 흐름의 분리 및 재부착현상을 잘 재현하는 것으로 알려진 DES(detached eddy simulation)모형을 이용하였다. 지배방정식은 유한요소법으로 해석한다. 유체영역에서 해석된 압력장을 이용하여 구조물에 작용하는 압력 분포를 계산하고 이를 이용하여 구조물의 변위 및 응력의 변화를 계산한다. 구조물의 변위는 유체의 흐름장을 변화시켜 흐름의 변화를 일으키게 된다. ADINA는 유체영역과 구조영역의 해석을 동적으로 연계하여 해석한다.

### 2.2 해석대상 및 해석방법

풍하측 실린더에서 발생하는 와류진동의 크기 분석을 위해 해석대상인 이중원형실린더의 풍상측 실린더를 고정시키고, 풍하측 실린더는 진동이 가능하도록 등가강성  $k=200\text{N/m}$ 를 가지는 스프링 요소 4개를 사용하여 지지하였다. 그리고 Tokoro 등(2000)의 풍동실험결과를 참조하여 케이블의 진동이 가장 크게 발생하는 조건으로 설정하기 위하여  $L/D = 4.0$ , 바람의 입사각은  $15^\circ$ 로 설정하였으며 결과의 비교를 위하여 바람의 입사각  $0^\circ$ 에 대해서도 모의를 실시하였다. 실린더의 직경,  $D$ 는  $0.05\text{m}$ 이고, 밀도는  $4,074\text{kg/m}^3$ 이며, 실린더의 고유진동수는  $1.73\text{Hz}$ 이다. 유체의 물성치로 밀도는  $1.2045\text{kg/m}^3$ , 점성계수는  $1.8176 \times 10^{-5}\text{kg/m}\cdot\text{s}$ 를 사용하였다. 해석을 위하여 15,320개의 요소를 이용하여 계산격자망을 구성하였다(그림 2 참조). 유입풍속은  $0.5 \sim 20\text{m/s}$ 의 범위로 레이놀즈수는  $1,656 \sim 66,225$ 의 범위에 있으며 계산시간간격은  $1/2,000$ 초를 이용하였다.

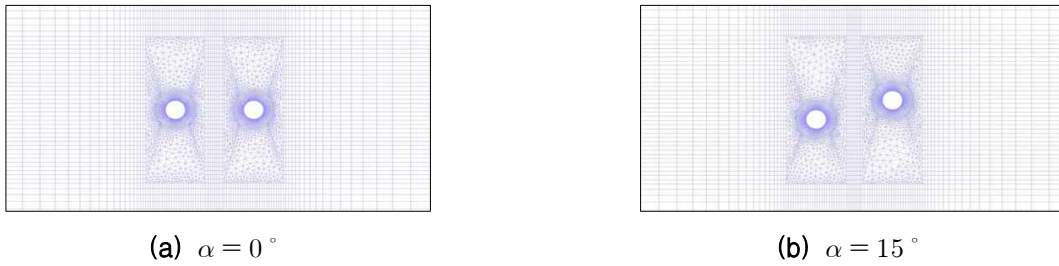


그림 2. 계산격자망

### 3. 모의결과

그림 3과 그림 4는 레이놀즈수가 9,934인 경우에 대해 바람의 입사각과 위상별로 유속분포를 도시한 것이다. 이중원형실린더 후면에서 Karman vortex가 강하게 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 특히, 바람의 입사각이 15°인 경우에 풍상측 실린더에서 방출되는 와류가 풍하측 실린더에 비대칭적인 영향을 미치고 있는데, 이를 통해 풍하측 실린더에 작용하는 공기력의 비대칭성을 유발할 것으로 추정할 수 있다.

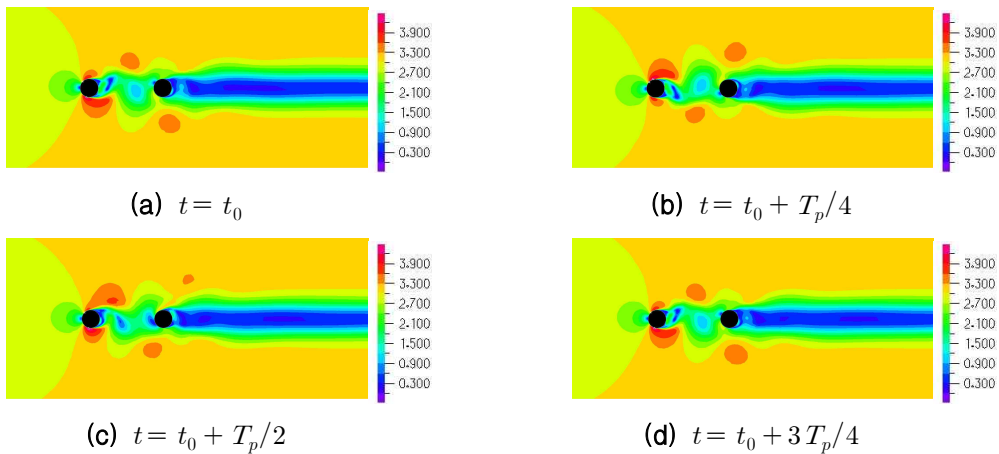


그림 3. 위상별 유속분포 (레이놀즈수는 9,934,  $\alpha = 0^\circ$ )

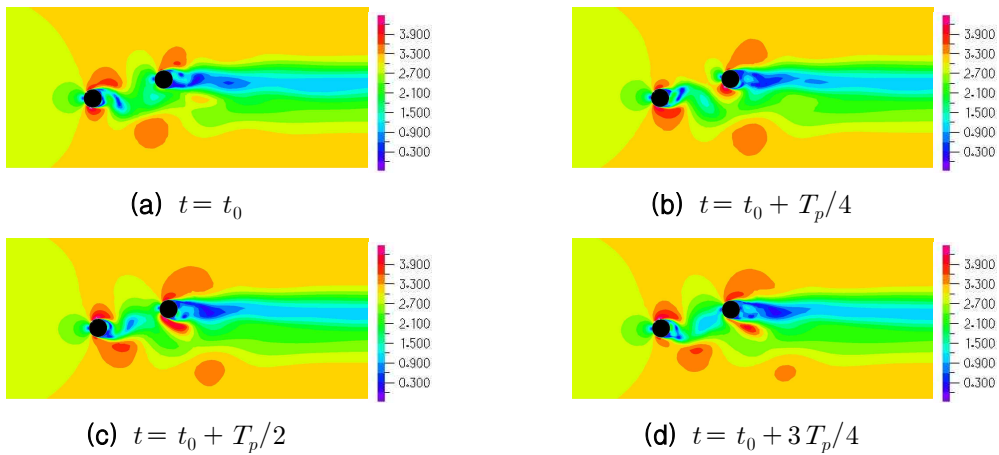


그림 4. 위상별 유속분포 (레이놀즈수는 9,934,  $\alpha = 15^\circ$ )

그림5와 그림6은 바람의 입사각이 0°와 15°인 경우, 유입풍속에 따른 풍하측 실린더의 공기력계수와 각 방향별 변위 시간이력곡선을 나타낸 것이다. 바람의 입사각이 0°인 경우 유입풍속에 관계없이 항력

계수와 양력계수는 조화곡선의 형태를 보이나, 바람의 입사각이 15°인 경우 조화곡선의 형태에서 벗어나는 경향을 보인다. 이는 그림4의 풍상측 실린더가 유발하는 와류가 풍하측 실린더에 미치는 영향으로 설명되는데, 풍상측 실린더가 유발하는 와류가 풍하측 실린더에 비대칭적으로 영향을 미치기 때문이다.

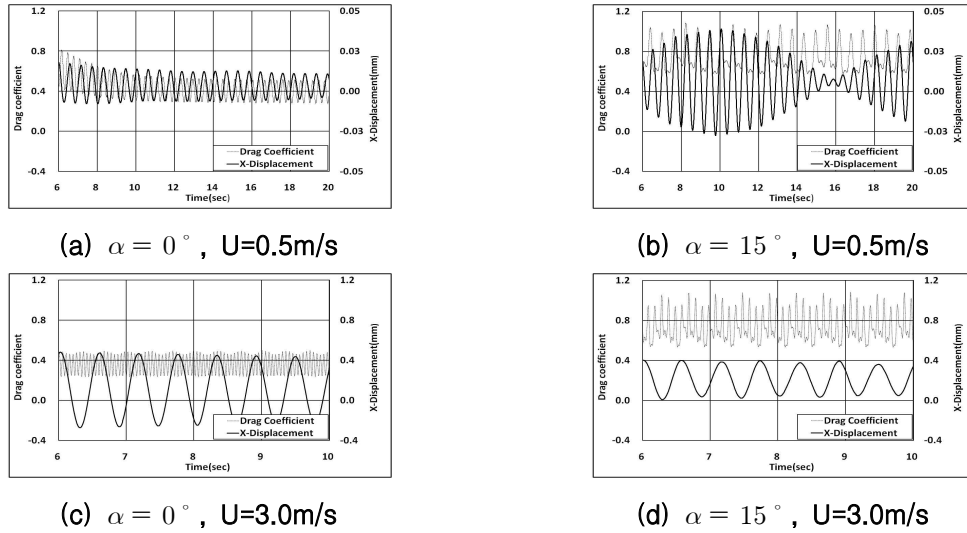


그림5. 항력계수 및 수평변위의 시간이력곡선

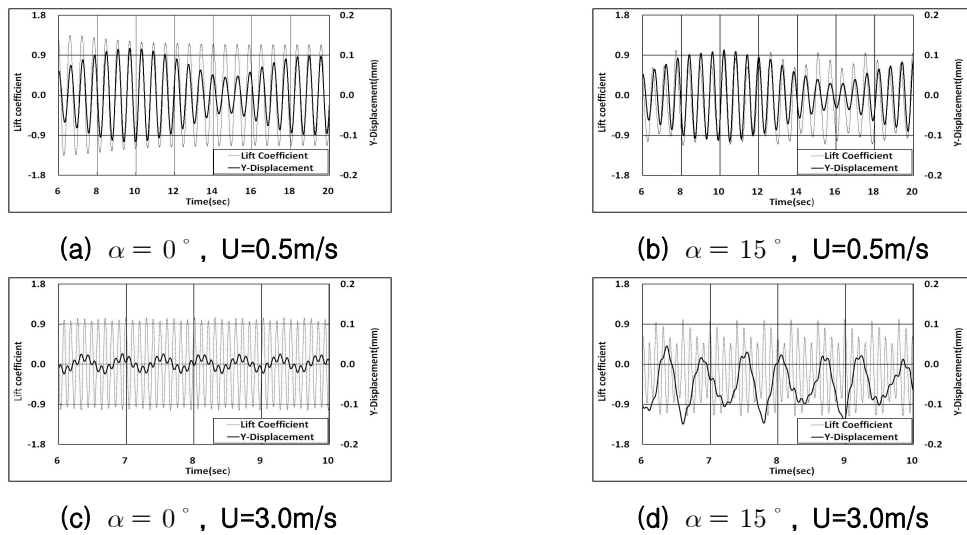


그림6. 양력계수 및 수직변위의 시간이력곡선

표 1. 풍하측 케이블의 각 방향 별 변위(단위:mm)

유입풍속 (m/s)	입사각(0°)		입사각(15°)		레이놀즈 수
	X-Displacement	Y-Displacement	X-Displacement	Y-Displacement	
0.5	-0.0079 ~ 0.0180	-0.1165 ~ 0.1169	-0.0276 ~ 0.0389	-0.1155 ~ 0.1131	1,656
3.0	-0.2740 ~ 0.4808	-0.0245 ~ 0.0262	0.0065 ~ 0.4002	-0.1490 ~ 0.0457	9,934
5.0	-0.3366 ~ 0.9306	-0.0338 ~ 0.0432	-0.0619 ~ 1.2353	-0.3111 ~ 0.0601	16,556
10.0	0.4983 ~ 2.1582	-0.0819 ~ 0.1273	0.5497 ~ 3.9357	-0.4043 ~ -0.0688	33,113
20.0	-1.2746 ~ 6.7977	-0.2888 ~ 0.0048	2.3971 ~ 12.9917	-1.4529 ~ -0.2903	66,225

표 1은 풍하측 실린더의 변위를 정리한 것이다. x방향의 변위는 풍속이 증가할수록 항력이 증가하므로 바람 방향으로 변위가 증가하는 경향을 보이며, 특히 바람의 입사각이 15°인 경우의 변위가 0°인 경우보다 크게 나타나고 있다. y방향의 변위 역시 풍속이 증가할수록 증가하고 있으며, 바람의 입사각이 15°인 경우에는 음의방향(풍상측 실린더 방향)으로 변위가 증가하는 경향성을 보이고 있다. 이는 그림 7을 통해 분명히 확인 할 수 있다.

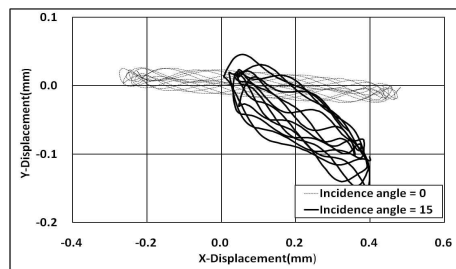


그림7. 풍하측실린더의 변위이력 (U=3.0m/s)

#### 4. 결 론

본 연구에서는 ADINA 모형의 FSI기법을 이용하여, 이중원형실린더의 풍하측 실린더에서 발생하는 와류진동의 크기를 분석함으로써, 사장케이블에서 발생하는 진동현상의 원인을 규명하고자 하였다. 본 연구결과, 유입풍속 및 바람의 입사각에 따라 이중원형실린더에서 발생하는 일반적인 와류방출현상과 풍하측 실린더에 작용하는 공기력 및 변위양상을 예측할 수 있었다. 특히, 바람의 입사각이 15°인 경우에는 풍상측 실린더에서 방출되는 와류로 인해 풍하측 실린더에는 비대칭 공기력이 작용하며, 이는 풍하측 실린더가 2사분면에서 4사분면 방향으로 진동하는 원인이 되는 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업의 연구비지원(05지역특성B05-01)에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. 이명재, 김현겸, 황재용(2008). 댐퍼도입에 의한 사장 케이블의 체진설계, Yooshin Engineering Corporation 기술회보 2008-02, pp. 121-133.
2. Liu, X., Levitan, M. and Nikitopoulos, D.(2008). Wind tunnel tests for mean drag and lift coefficients on multiple circular cylinders arranged in-line, J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 96, pp. 831-839.
3. Simu, E. and Scanlan, R. H.(1996). Wind effects on structures, 3rd edition, John Wiley & Sons, New York, pp. 246-257.
4. Sumner, D., Richards, M.D. and Akosile, O.O.(2008). Strouhal number data for two staggered circular cylinders, J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 96, pp. 859-871.
5. Tokoro, S., Komatsu, H., Nakasu, M., Mizuguchi, K. and Kasuga, A.(2000). A study on wake-galloping employing full aeroelastic twin cable model, J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 88, pp. 247-261.