

이중원형실린더에서 발생하는 와류방출 해석

Vortex Shedding Analysis for Two Staggered Circular Cylinders

김대근*, 김성만**, 김동옥***

Dae Geun Kim, Sung Man Kim, Dong Ok Kim

요 지

케이블 교량에서 발생하는 사장케이블의 진동현상에 대한 현상학적 특성을 명확히 이해해야, 사장케이블의 적합한 제진설계가 가능하다. 본 연구에서는 ADINA CFD 코드를 이용하여, 이중원형실린더에서 발생하는 와류방출현상과 실린더에 작용하는 외력을 해석함으로써, 사장케이블에서 발생하는 진동현상의 원인을 규명하고자 하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 흐름의 레이놀즈수, 실린더간 간격과 이중원형실린더에 대한 바람의 입사각을 변화시키며 이중원형실린더에서 발생하는 와류방출현상과 이로 인해 실린더에 작용하는 항력, 양력과 같은 외력을 분석하였다. 분석 결과, 풍상측 케이블에는 일방향의 항력이 주로 작용하므로 케이블 진동이 제한적으로 발생하나, 풍하측 케이블에는 항력과 같은 규모의 진동하는 양력이 작용하는 것으로 나타났다. 이로 인해 풍하측 케이블에서 진동이 크게 발생하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 사장케이블, 제진, ADINA, 이중원형실린더, 와류방출, 양력

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 않은 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).

이중원형실린더에 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

* 정회원·목포대학교 공과대학 건설공학부 토목공학전공 조교수·E-mail : kdj05@mokpo.ac.kr

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

*** 목포대학교 공과대학 건설공학부 토목공학전공 석사과정·E-mail : n3822@naver.com

($L/D < 1.5$)에는 두 개가 실린더가 하나의 구조물처럼 거동하여 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 단독원형실린더에서의 와류방출 주파수와 거의 동일한 결과를 보였다.

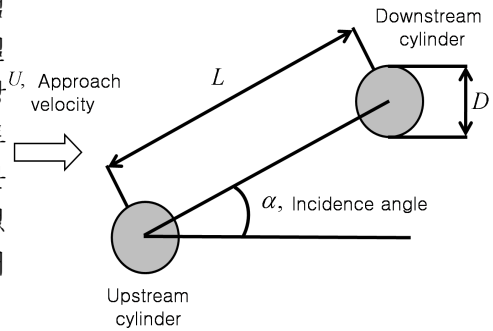


그림 1. 이중원형실린더의 개념도

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 보이거나, 한계간격 이상에서는 급격히 항력이 증가하는 양상을 보인다. Gu 등(1993)은 고레이놀즈수영역($Re = 650,000$)에서 한계간격은 $L/D = 2.0$ 을 제시하였었다. Tokoro 등(2000)은 평행케이블에서의 웨이크궤로평현상을 풍동실험을 통해 재현하였다. 이들의 실험에서 $L/D = 4.3$, 바람의 입사각(α)은 15도인 경우에 케이블의 진동이 가장 크게 발생하는 것으로 나타났다.

또한 최근에는 전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD)을 이용한 풍하중 산정과 구조물과의 상호작용 해석이 점차 풍동실험을 보완 또는 대체할 수 있는 효과적인 방법으로 간주되고 있다(김대근 등, 2008).

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 와류방출에 관한 연구는 풍동실험을 통해서 주로 이루어지고 있으며, CFD 해석을 통한 접근은 미미한 실정이다. 본 연구에서는 상용코드인 ADINA를 이용하여 이중원형실린더에서의 와류방출현상과 공기력계수를 해석하고 그 특성을 분석하였다. 분석을 통해 사장케이블에서 발생하는 진동현상의 원인을 규명하였다. 본 연구에서는 Tokoro 등(2000)의 풍동실험결과를 참조하여 이중원형실린더간의 거리와 바람의 입사각을 결정하였으며, 흐름의 레이놀즈수에 따른 와류방출현상과 공기력계수의 변동양상을 분석하였다.

2. 연구방법

2.1 해석모형

본 연구에서 사용한 모형은 ADINA(ver. 8.4)로 CFD모듈을 이용하였다. 유체의 흐름을 지배하는 방정식은 직교좌표계에서 비압축성유체의 흐름을 해석하기 위한 다음과 같은 시간평균 Navier-Stokes 방정식(레이놀즈방정식)이다.

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \tag{1}$$

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} - \nabla \cdot \vec{\tau} = \vec{f}^B \tag{2}$$

위에서 t 는 시간, ρ 는 밀도, \vec{v} 는 속도벡터, $\vec{\tau}$ 는 응력텐서(stress tensor)로 압력과 유체의 변형 및 점성의 함수이다. \vec{f}^B 는 외력벡터로 가장 중요한 외력은 중력이다. 난류모형은 흐름의 분리 및 재부착현상을 잘 재현하는 것으로 알려진 DES(detached eddy simulation)모델을 이용하였다. 지배방정식은 유한요소법으로 해석한다.

2.2 해석대상 및 해석방법

해석대상인 이중원형실린더는 Tokoro 등(2000)의 풍동실험결과를 참조하여 케이블의 진동이 가장 크게 발생하는 조건으로 설정하기 위하여 $L/D=4.0$, 바람의 입사각은 15로 설정하였으며 결과의 비교를 위하여 바람의 입사각 0° 에 대해서도 모의를 실시하였다. 실린더의 직경, D 는 0.25m이다. 유체의 물성치로 밀도는 1.2045kg/m^3 , 점성계수는 $1.8176 \times 10^{-5}\text{kg/m}\cdot\text{s}$ 를 사용하였다. 해석을 위하여 11,000개의 요소를 이용하여 계산격자망을 구성하였다(그림 2 참조). 유입풍속은 $0.3\sim 20\text{m/s}$ 의 범위로 레이놀즈수는 $4,970\sim 331,344$ 의 범위에 있으며 계산시간간격은 $1/1,000$ 초를 이용하였다.

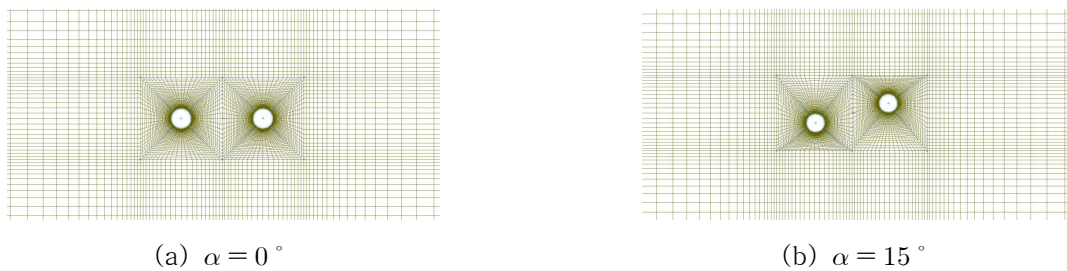


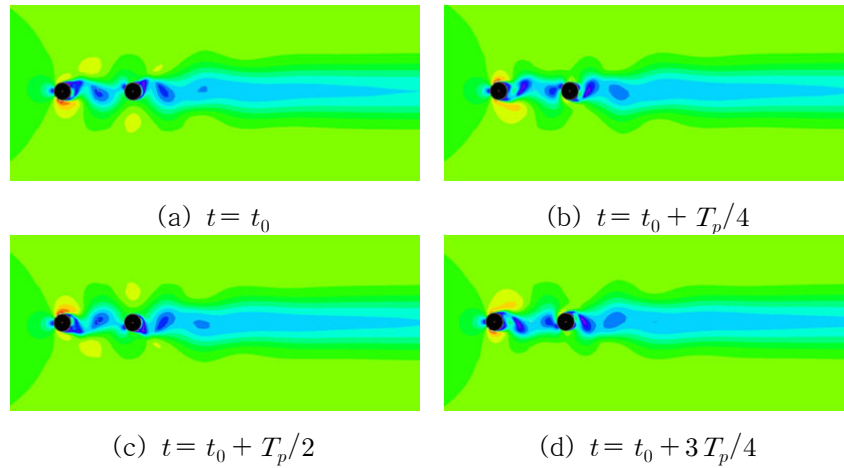
그림 2. 계산격자망

3. 모의결과

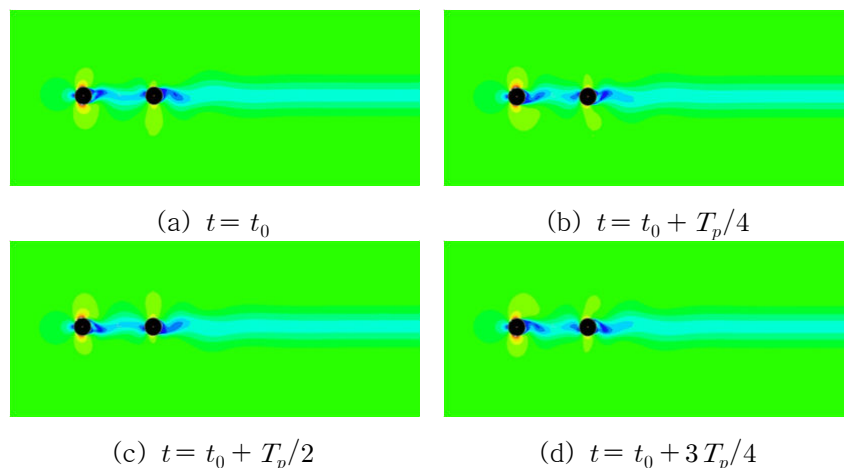
그림 3과 그림 4는 레이놀즈수가 4,970인 경우와 331,344인 경우의 위상별 유속분포를 도시한 것이다. 레이놀즈수가 4,970인 경우에 이중원형실린더 후면에서 와류가 강하게 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 즉, 레이놀즈수가 4,970인 경우에는 Karman vortex가 지배적으로 발생하며, 레이놀즈수가 331,344인 경우에는 상대적으로 폭이 좁은 후류(turbulent wake)가 지배적으로 발생하는 흐름을 잘 보여주고 있다.

표 1은 레이놀즈수에 따른 공기력계수와 Strouhal수를 정리한 것이다. Sumner 등(2007)은 $L/D > 2.5$ 인 경우(레이놀즈수 50,000)에 Strouhal수는 상, 하류 실린더 모두 약 0.17인 것으로 제시하고 있다. 그리고 Simu and Scanlan(1996)은 단일실린더에서 Strouhal수는 약 0.20으로 제시하고 있다. Liu 등(2008)은 $L/D=4.0$ 인 경우(레이놀즈수 86,000)에 상류측 항력계수는 0.65, 하류측 항력계수는 0.54임을 제시하고 있다. 이상의 실험자료와 본 연구결과를 비교하면 대체로 양호한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. 바람의 영각에 따른 항력을 살펴보면, 풍상측 실린더에 작용하는 항력은 영각에 따른 변화가 미미한 반면에, 풍하측 실린더에 작용하는 항력은 대체로 영각이 15인 경우에 크게 작용하고 있다. 바람의 영각에 따른 양력을 살펴보면, 영각이 0° 인 경우에 풍상측 풍하측 실린더 모두에서 대칭적인 양력이 발생하고 있으나, 영각이 15인 경우에는 풍상측과 풍하측에 작용하는 양력의 방향이 서로 반대임을 알 수 있다. 또한 절대적인 양력의 크기

가 증가하는 현상을 확인할 수 있는데, 이러한 현상은 케이블의 웨이크궤로핑 현상의 발현과 직, 간접적인 관련이 있을 것으로 판단된다.



(a) $t = t_0$ (b) $t = t_0 + T_p/4$
(c) $t = t_0 + T_p/2$ (d) $t = t_0 + 3T_p/4$
그림 3. 위상별 유속분포 (레이놀즈수는 4,970)



(a) $t = t_0$ (b) $t = t_0 + T_p/4$
(c) $t = t_0 + T_p/2$ (d) $t = t_0 + 3T_p/4$
그림 4. 위상별 유속분포 (레이놀즈수는 331,344)

표 1. 공기력계수와 Strouhal 수

유입풍속 (m/s)	구 분	입사각(0°)		입사각(15°)		레이놀즈수
		Upwind cylinder	Downwind cylinder	Upwind cylinder	Downwind cylinder	
0.3	C_D	1.0239 ~ 1.1615	0.4589 ~ 0.7753	1.0063 ~ 1.1548	-0.7923 ~ 0.9431	4,970
	C_L	-0.9076 ~ 0.9071	-1.2865 ~ 1.2512	0.5958 ~ 1.0001	-1.1671 ~ 0.7551	
	Strouhal 수	0.158	0.157	0.157	0.157	
1.0	C_D	0.9711 ~ 1.1120	0.4111 ~ 0.7253	0.9073 ~ 1.0894	-0.6420 ~ 1.1637	16,567
	C_L	-0.9519 ~ 0.9480	-1.2716 ~ 1.1256	0.6631 ~ 0.8798	-1.2441 ~ 0.4580	
	Strouhal 수	0.166	0.165	0.169	0.170	
5.0	C_D	0.6610 ~ 0.7165	0.4293 ~ 0.5880	0.6319 ~ 0.8186	0.5965 ~ 0.6751	82,836
	C_L	-0.7152 ~ 0.7069	-1.1158 ~ 0.8593	0.0520 ~ 1.3737	-1.5531 ~ 0.0440	
	Strouhal 수	0.189	0.189	0.194	0.194	

표 1. 공기력계수와 Strouhal 수 (계속)

유입풍속 (m/s)	구 분	입사각(0°)		입사각(15°)		레이놀즈수
		Upwind cylinder	Downwind cylinder	Upwind cylinder	Downwind cylinder	
10.0	C_D	0.5900 ~ 0.6279	0.4316 ~ 0.5345	0.5797 ~ 0.7244	0.5430 ~ 0.6210	165,672
	C_L	-0.6191 ~ 0.6125	-0.9665 ~ 0.7871	0.0802 ~ 1.2271	-1.3837 ~ 0.0179	
	Strouhal 수	0.192	0.192	0.198	0.198	
20.0	C_D	0.5490 ~ 0.5808	0.4427 ~ 0.5071	0.5516 ~ 0.6542	0.4963 ~ 0.5971	331,344
	C_L	-0.5296 ~ 0.5242	-0.8322 ~ 0.7201	0.0871 ~ 1.0546	-1.1799 ~ -0.0806	
	Strouhal 수	0.195	0.195	0.189	0.189	

4. 결 론

본 연구에서는 ADINA CFD 코드를 이용하여, 이중원형실린더에서 발생하는 와류방출현상과 실린더에 작용하는 외력을 해석함으로써, 사장케이블에서 발생하는 진동현상의 원인을 규명하고자 하였다. 본 연구결과, 이중원형실린더에서 발생하는 일반적인 와류방출현상과 공기력계수를 합리적으로 예측할 수 있었으며, 특히 영각이 15 인 경우에 발생하는 풍하측 양력의 형태에서 케이블의 웨이크갬로핑 현상을 심화시키는 원인을 추론할 수 있었다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 이명재, 김현겸, 황재웅(2008). 댐퍼도입에 의한 사장 케이블의 제진설계, Yooshin Engineering Corporation 기술회보 2008-02, pp. 121-133.
2. Simu, E. and Scanlan, R. H.(1996). Wind effects on structures, 3rd edition, John Wiley & Sons, New York, pp. 246-257.
3. 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.
4. 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.
5. 김대근, 김호경, 이상훈(2008). 방호울타리 설치에 따른 교량단면의 공기역학 특성 해석, 한국 풍공학회논문집, 제12권, 제3호, pp. 201-209.
6. 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.