

전단건물을 이용한 와류발산현상 파악

이상호^{1*}

¹단국대학교 토목환경공학과 교수

Investigation of the Vortex Shedding with the Shear Building

Sang Ho Lee^{1*}

¹Professor of Civil and Environmental Engineering, Dankook University

요 약 와류발산현상을 파악하기 위한 풍동과 2층 전단건물을 제작하였다. 풍동은 풍속이 24m/s까지 구현되도록 제작하였으며, 전단건물은 고유 진동수가 풍동에서 구현 할 수 있는 와류 진동수 범위에 속하도록 설계되었다. 원통형 실린더를 부착한 전단건물의 풍동실험을 수행하여 locking-on 현상에 의한 공명현상을 관찰하였다. 또한 관찰된 결과로부터 와류발산하중은 실린더의 진폭과 진동수의 영향이 작용하는 것을 파악하였다.

Abstract To study the vortex induced vibrations the wind tunnel and the two story shear building were designed and built. The wind tunnel was designed to generate the wind speed up to 24 m/s, and the building was designed to have the two lowest natural frequencies within the range of the vortex frequencies generated by the wind tunnel. The resonance behaviors by the locking-on phenomena were observed during the wind tunnel tests of the shear building with the cylinder attached. From the locking-on phenomena observed it is found that the effects of the amplitudes and the frequencies of the cylinders should be considered on the forces generated by the vortex shedding.

Key Words : Vortex Shedding, Locking-on, Shear building

1. 서론

레이놀드 수가 증가함에 따라 균일선상유동(uniform laminar flow)에 놓인 실린더 후방에는 와류가 형성된다. 레이놀드 수가 40~70인 영역에서는 두 개의 와류가 대칭을 이루며 생성과 소멸을 반복하나 레이놀드 수가 90 이상이 되면 대칭을 이룬 두개의 와류는 불안정한 상태가 되어 서로 반대편에서 번갈아 가며 주기적으로 와류가 형성된다. 실린더 후방에 형성된 주기적인 와류는 유체의 흐름을 따라 공간상에 분포하게 되며 이러한 와류의 분포를 Karman vortex street[1]이라 한다. 실린더 후방 표면에 형성된 와류는 Kutta-Joukowski 법칙[2]에 의하여 실린더에 횡 방향 힘을 가하게 되며, 서로 반대편에서 번갈아가며 와류가 형성될 때에는 주기적인 힘이 실린더에 작용하게 된다.

원통형 실린더에 주기적인 횡 방향 힘을 가하는 와류 발산의 진동수는 다음과 같다.[2]

$$f_s = \frac{S \cdot V}{D} \quad (1)$$

여기서, f_s : 와류발산진동수

V : 유체의 속도

D : 실린더의 직경

S 는 Strouhal 수로 다음과 같으며,

$$S = 0.198 \left(1 - 19.7 / Re \right) \quad (2)$$

여기서 Re 는 레이놀드 수이다. 균일선상유동에 놓인 원통형 실린더의 레이놀드 수는 아래 식 (3)과 같이 표현

본 논문은 2006년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음..

*교신저자 : 이상호(shlee@dankook.ac.kr)

접수일 10년 04월 05일

수정일 10년 05월 10일

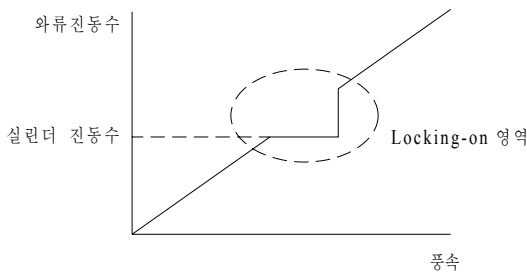
게재확정일 10년 05월 13일

되며 이 식은 항력계수(drag coefficient)의 변화에 따라 흐름영역을 구분하기 위하여 사용된다.

$$Re = VD/\nu \quad (3)$$

여기서, ν : 동점성계수(kinematic viscosity)

식 (1)에 나타난 와류진동수는 풍속에 비례하고 실린더의 직경에 반비례한다. 그러나 진동중인 실린더에서는 와류발산진동수가 실린더의 진동수에 동조되는 현상이 아래의 그림 1과 같이 나타나며 이러한 현상을 locking-on 현상이라 한다.



[그림 1] Locking-on 현상

와류발산에 의해 실린더에 작용하는 횡 방향 힘은 다음과 같다.[3]

$$F(t) = \frac{1}{2} \rho V^2 C_L D \sin 2\pi f_s t. \quad (4)$$

여기서, ρ : 유체의 밀도

C_L : 양력계수 (lift coefficient)

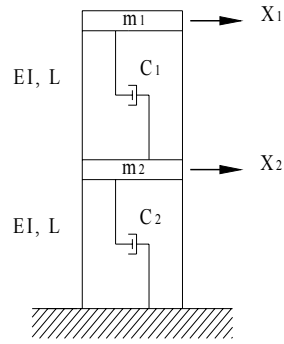
f_s : 와류발산 진동수

원통형 구조물은 타워, 안테나, 케이블 그리고 잠수함의 잠망경이나 수중파일 등에 사용되며 이들에 대한 해석 및 설계 시에 와류발산현상도 변수의 하나로 고려하여야한다. 이에 본 연구에서는 와류발산현상을 파악하기 위한 방법으로 풍동과 2층 전단건물을 제작하며 제작된 전단건물에 실린더를 부착하여 풍동실험을 수행한다.

2. 실험모델

와류발산현상을 파악하기 위한 실험모델로 아래와 같

은 2층 전단건물을 고려하였다. 그림 2의 구조물은 각 부재의 축 방향 변형을 무시하고 수평부재를 강체로 보면 수평방향의 자유도만을 갖는 2자유도 구조물이 되며, 각 층의 질량, 감쇠, 그리고 자유도가 그림에 나타나 있다.



[그림 2] 전단건물

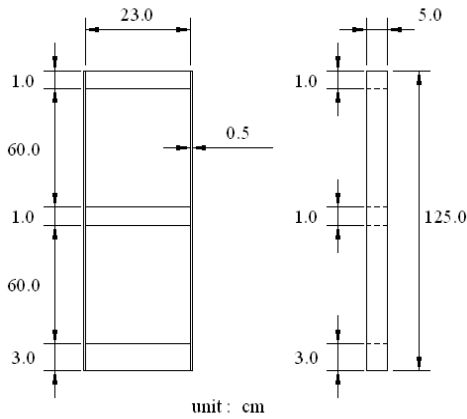
각층의 질량과 높이가 동일한 경우 위 구조물의 고유진동수는 아래와 같고,

$$w_1 = 3.027 \sqrt{\frac{EI}{mL^3}}, \quad w_2 = 7.927 \sqrt{\frac{EI}{mL^3}}$$

모드형상은 다음과 같다.

$$\phi_1 = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0.6181 \end{Bmatrix}, \quad \phi_2 = \begin{Bmatrix} 1 \\ -1.6181 \end{Bmatrix}$$

풍동실험에 사용될 전단건물은 건물의 고유진동수가 풍동에서 구현 할 수 있는 와류 진동수 범위에 속하도록 설계하였다. 설계결과 SS41 강으로 이루어진 각 층의 수평부재를 아래의 그림과 같이 1cm와 3cm의 두께로 제작하여 서로 다른 질량을 갖도록 하였으며 이는 거꾸로 고정시켰을 시 고유진동수에 변화를 주기 위함이다. 또한 수평부재에는 와류발산을 발생시키기 위한 실린더를 부착할 수 있도록 각각 1/2, 1/3, 2/3 지점에 $\phi 5\text{mm}$ 볼트 홀을 설치하였다. 설계된 모델은 SS41 강을 사용하여 제작되었으며 제작된 실험모델의 제원은 아래와 같다.

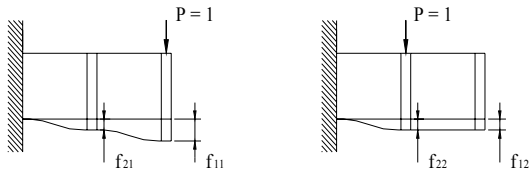


[그림 3] 실험모델

3. 정적 및 자유진동 실험

실험모델의 강성행렬을 구하기 위한 정적실험과 고유진동수를 구하기 위한 자유진동 실험을 수행하였다.

강성행렬을 파악하기 위한 정적실험에서는 강성행렬은 유연도 행렬의 역행렬이 되며, 단위 하중을 각 자유도에 차례로 작용시킬 때 각 자유도에 발생된 변위는 아래의 그림 4와 같이 유연도 행렬의 요소가 되는 원리를 이용하였다.



[그림 4] 유연도 행렬

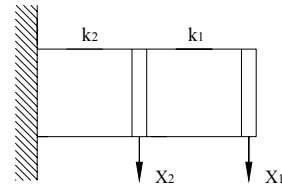
강성행렬을 구하기 위한 정적실험에서는 각 자유도에 차례로 하중을 작용 시켜 각 자유도에 발생된 변위를 측정하였으며 측정된 변위를 이용하여 하중-변위 곡선을 작성하였다. 작성된 곡선의 기울기를 이용하여 구한 유연도 행렬은 다음과 같다.

$$\underline{F}_{E1} = \begin{bmatrix} 2.85 & 1.46 \\ 1.39 & 1.26 \end{bmatrix} \times 10^{-4} \quad m/N$$

유연도 행렬의 역행렬인 강성 행렬은 다음과 같다.

$$\underline{K}_{E1} = \begin{bmatrix} 8.06 & -9.34 \\ -8.89 & 18.2 \end{bmatrix} \times 10^3 \quad N/m$$

제작된 실험모델의 강성행렬은 아래 그림 6에 나타난 각층의 강성을 이용하여도 나타낼 수 있으며,



[그림 5] 층 강성

이때의 강성행렬은 다음과 같다.

$$\underline{K} = \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1 + k \end{bmatrix} \quad (12)$$

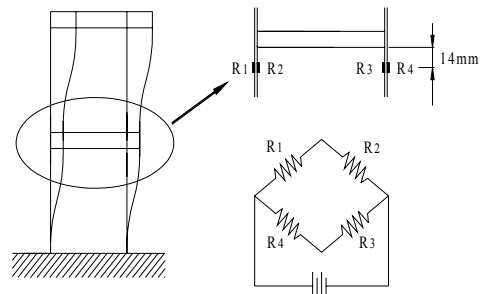
각 층의 강성으로 이루어진 식(12)의 강성행렬을 구하기 위하여 중간층을 고정시킨 후 각 층에 대한 정적실험을 수행하였다. 정적실험을 통하여 작성된 하중-변위 곡선으로부터 각 층의 강성을 구하였으며, 각 층의 강성을 이용하여 작성된 강성행렬은 다음과 같다.

$$\underline{K}_{E2} = \begin{bmatrix} 9.57 & -9.57 \\ -9.57 & 19.1 \end{bmatrix} \times 10^3 \quad N/m$$

제작된 실험모델의 단면특성과 SS41 강의 재료특성을 식(12)에 대입하여 구한 강성행렬은 아래와 같다.

$$\underline{K}_M = \begin{bmatrix} 11.9 & -11.9 \\ -11.9 & 23.8 \end{bmatrix} \times 10^3 \quad N/m$$

제작된 실험모델의 고유진동수를 파악하기 위하여 자유진동 실험을 실시하였다. 자유진동 실험 시 아래의 그림과 같이 스트레인 게이지를 부착하고 힘 변형률로 이루어진 신호를 볼 수 있도록 연결하였다.



[그림 6] 자유진동 측정

실험모델의 고유 진동수는 자유진동 시 측정된 변형을 -시간 이력곡선을 진동수 영역으로 변환 시키어 구할 수 있으며 본 연구에서는 시간이력곡선에 대한 진동수영역의 파워스펙트럼을 제공하는 LabView signal express 프로그램을 이용하여 고유진동수를 구하였다.

초기변위에 의해 발생된 자유진동 곡선을 진동수 영역의 파워스펙트럼으로 변환한 결과 1차 모드의 거동이 지배적인 거동으로 첫 번째 고유진동수는 6.34Hz 그리고 두 번째 고유진동수는 18.34Hz를 보이었다.

구조해석 프로그램을 이용한 자유진동 해석을 수행하여 실험모델의 고유 진동수를 구하였다. 표 1에는 해석결과와 함께 실험결과가 나타나 있으며 표에 나타난 3번째와 4번째 진동수는 면외모드의 고유진동수이다.

[표 1] 실험모델 고유진동수

Mode No.	고유진동수(Hz)	
	해석	실험
1	6.697	6.34
2	18.93	18.34
3	65.03	
4	71.72	

비감쇠 자유진동에서는 시간이 경과하여도 진폭의 변화가 발생하지 않으나 실제 구조물에서는 진폭이 감소한다. 실제 구조물에서 발생하는 이러한 현상은 감쇠기를 사용하여 나타낼 수 있다.

실험모델에서는 그림 2에서와 같이 각 층 사이를 연결하는 선형점성 감쇠기를 가정하였으며, 가정된 감쇠기의 감쇠계수는 중간층을 고정하고 각 층에 대한 자유진동 실험을 실시하여 구하였다. 자유진동 실험결과를 이용하여 구한 감쇠행렬은 다음과 같다.

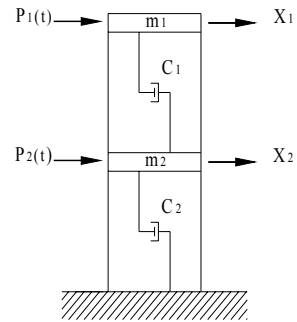
$$\underline{C} = \begin{bmatrix} 2.02 & -2.02 \\ -2.02 & 5.96 \end{bmatrix} \frac{N}{m/sec}$$

4. 풍동실험

와류발산현상을 파악하기 위하여 실린더를 부착한 2층 전단건물의 풍동실험을 수행하였다.

풍동 실험 시 실린더에 발생하는 와류발산에 의해 실험모델에는 주기하중이 작용한다. 그림 7에 나타난 수학적 모델에는 와류발산에 의해 발생된 하중이 나타나 있으며 이때 하중의 크기와 방향 그리고 진동수는 실린더

의 종류와 부착위치에 따라 변화한다.



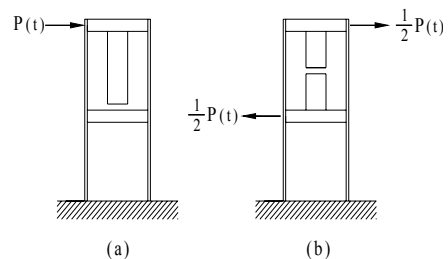
[그림 7] 수학적 모델

위에 나타난 구조물의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_1 \\ \ddot{X}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \end{Bmatrix}$$

와류발산현상을 파악하기 위한 실린더의 종류와 부착 위치를 파악하기 위하여 공명현상 시의 안정상태응답 (steady state response)을 계산하였다. 계산 시 하중의 작용위치와 방향은 “와류의 형성은 구조물의 변위형상과 완전한 상관관계(perfectly correlated relation across the span)를 갖는다.”는[3] 원리를 고려하여 결정하였다.

계산 시 실험을 통하여 구한 감쇠행렬은 직교성을 갖고 있지 않기 때문에 수치적분법으로 안정상태응답을 구하였다. 계산결과 1차 모드에서는 아래 그림 8의 (a)와 같이 그리고 2차 모드에서는 (b)와 같은 실린더 부착이 와류발산현상을 구현하는데 효과적인 것으로 나타났다.



[그림 8] 와류발산하중

풍동실험을 위하여 최대 24m/s 의 풍속을 구현 할 수 있는 풍동을 제작하였다. 풍속의 조절은 바람의 유입을

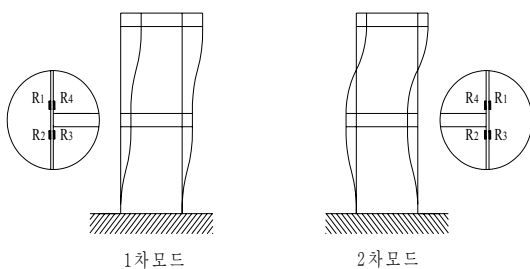
가감 시키는 방법을 사용하였으며 이를 위하여 풍동 토출구에 여닫이 식 장치와 강풍기 후방에 댐퍼를 설치하였다.

그림 8의 (a)와 같이 실험모델 상층에 직경 16.4cm 질량 522g의 PVC실린더를 부착하고 풍동실험을 수행하였으며 아래의 그림 9에는 풍동실험 시 사용된 실험모델이 나타나 있다.



[그림 9] 실험모델

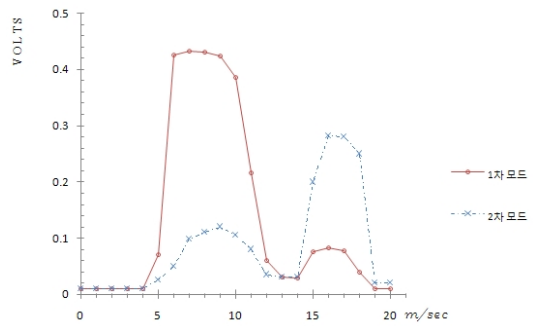
아래의 그림 10에는 풍동실험 시 실험모델의 거동을 파악하기 위한 두 가지 결선방법이 나타나 있다. 이러한 결선방법은 다른 모드의 신호를 가능한 제거하기 위함이다.



[그림 10] 결선방법

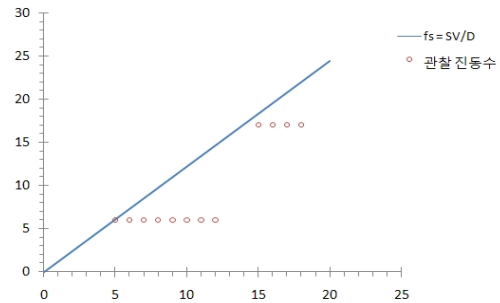
풍동 실험 시 관찰된 주요거동은 풍속 8 m/sec.에서 6 Hz의 1차 모드 거동이 그리고 17 m/sec에서 17 Hz의 2차 모드의 거동이 관찰 되었다. 그러나 4.5 m/sec. 이하와 19m/sec. 이상의 풍속에서는 주목할 만한 거동이 관찰 되지 않았다.

아래 그림 11에는 그림 10에 나타난 브리지에서 측정된 전위차가 풍속에 대하여 나타나 있다.



[그림 11] 풍동실험

아래의 그림 12에는 풍동실험 시 관찰된 진동수가 풍속에 대하여 나타나 있으며 그림에 나타난 직선은 식 (1)에 표현된 와류발산진동수이다.



[그림 12] 측정 진동수

5. 실험결과 분석

실험을 통하여 구한 강성행렬들의 요소사이에는 최대 20%의 이상의 차이가 나타났다. 이러한 차이는 실험모델에서는 각 층의 수평방향 자유도만이 고려되었으나 제작된 모델의 실제거동에는 연결부의 회전방향 자유도가 포함되어 있기 때문이다. 연결부의 회전방향 자유도를 고려하여 수행한 자유진동 해석 결과는 실험결과와 잘 일치하였으며 이로부터 제작된 모델의 실제거동에는 연결부의 회전방향 자유도가 포함되어 있음을 알 수 있다.

그림 11에 나타난 풍동실험결과는 다음과 같이 설명할 수 있다. 부착된 실린더의 와류발산진동수가 실험모델의 고유진동수에 접근하면 실험모델에는 미소한 진동이 발생 된다. 실험모델에 진동이 발생함에 따라 와류발산진동수는 부착된 실린더의 진동수에 동조하게 된다. 여기서 풍속을 더 증가 시키면 와류발산진동수가 구조물의 고유진동수와 동조되는 locking-on 현상에 의한 공명현상이

발생된다. 이러한 공명현상은 일정한 풍속영역까지 계속되며 풍속이 더욱 증가하여 와류발산진동수가 실린더의 진동수로부터 이탈될 때까지 지속된다. 그림을 보면 이러한 공명현상이 1차 모드와 2차 모드에서 발생하는 것을 볼 수 있다.

또한 그림 11을 보면 locking-on 영역의 진입과 이탈과정에서 급격한 진폭의 증가와 감소가 이루어지는 것을 볼 수 있다. 이러한 급격한 변화의 발생원인은 실린더의 진폭이 증가함에 따라 실린더에 가해지는 횡 방향 힘이 증가하기 때문이다. 진입과정에서는 풍속이 증가함에 따라 실린더의 진폭이 증가하며, 진폭이 증가하면 실린더에 가해지는 힘이 증가하고, 증가된 힘은 다시 진폭을 증가시키는 현상이, 즉 이들 사이의 상승작용에 의해 진폭이 급격히 증가하는 현상이 발생된다. 반면에 이탈 시에는 이와 반대의 현상으로 인한 감소현상이 발생한다.

서로 다른 진동수를 갖는 모드에서 발생된 locking-on 영역을 그림 11에서 비교하여 보면 진입과 이탈과정 그리고 진폭에서 차이가 나는 것을 볼 수 있으며 이러한 차이는 각 모드 사이의 동역학적 차이뿐 아니라 실린더의 진폭과 진동수에 대한 영향이 작용하기 때문이다.

그림 12에 나타난 각 모드의 locking-on 영역은 와류발산진동수가 고유진동수보다 큰 풍속영역에 분포되어 있다. 즉 직선으로 표시된 와류발산진동수 식의 우측에 분포하는 것을 볼 수 있다. 또한 영역의 크기와 위치에서 차이가 나는 것을 볼 수 있으며 이러한 차이도 실린더의 진폭과 진동수에 의한 영향이 작용하기 때문이다.

이러한 결과로부터 식(4)에 나타난 와류발산하중은 실린더의 진폭과 진동수가 고려되지 않은 식으로 이 식은 고정된 실린더에만 적용 가능한 식으로 판단된다.

그림 11에 나타난 진동 초기의 풍속을 이용하여 계산한 Strouhal 수는 1차 모드에서는 0.21 그리고 2차 모드에서는 0.19를 보이며 와류발산 진동수를 구하는 식 (1)의 적합성을 확인 할 수 있다.

6. 결론

실린더를 부착한 2층 전단건물의 풍동실험을 수행하여 locking-on 현상에 의한 공명현상을 재현하였다. 재현된 결과로부터 아래와 같은 결론을 도출하였다.

와류발산 하중은 풍속과 실린더의 직경뿐 아니라 실린더의 진폭과 진동수에 대한 영향이 작용하며 이러한 영향이 locking-on 영역의 크기와 위치를 결정한다.

모드별로 발생된 진동초기의 풍속을 이용하여 구한 Strouhal 수로부터 와류발산진동수 식에 대한 적합성을

확인하였다.

풍동실험 시 관찰된 거동은 1차 모드와 2차 모드의 공명현상만을 관찰 할 수 있었으며 다른 진동수의 거동은 관찰되지 않았다. 따라서 와류발산 시 발생 가능한 구조물의 거동은 locking-on 현상에 의한 공명현상으로 판단된다.

전단건물을 이용한 와류발산하중의 파악은 연결부의 회전방향 자유도로 인한 감쇠행렬 파악의 어려움과 locking-on 영역의 진입과 이탈 시 발생된 급격한 진폭의 변화로 이루어지지 않았다. 따라서 실린더의 진폭과 진동수에 대한 영향을 파악하기 위해서는 진폭과 진동수를 기계적으로 조절 할 수 있는 장치의 개발이 요구된다.

참고문헌

- [1] Barnes, W. McCormick, Aerodynamics, Aeronautics and Flight Mechanics, pp 162-180, Prentice, 1994.
- [2] Massey, Mechanics of Fluid, pp 286-290, Nostrand, 2006.
- [3] Robert D. Blevins, Flow - induced Vibration, pp. 34-192, Nostrand, 2001.
- [4] K. Yusuf Blillah, " Resonance, Tacoma Narrows bridge failure, and undergraduate physics textbook", Am. J. Phys. 59(2), pp. 118-124, American Association of Physics Teachers, 1991.

이 상 호(Sang-Ho Lee)

[정회원]



- 1983년 5월 : North Carolina State University 토목공학과 (공학석사)
- 1988년 5월 : North Carolina State University 토목공학과 (공학박사)
- 1990년 9월 ~ 현재 : 단국대학교 토목환경공학과 교수

<관심분야>

내진해석, 충돌해석