

지하철 운행에 의한 건축물 진동 평가

서정범¹, 박용석^{2*}, 홍성철³

Evaluation of Subway Induced Vibration Effects on Building Structures

Jeong-Beom Seo¹, Yong-Suk Park^{2*} and Sung-Chul Hong³

요약 건축 구조물의 진동특성은 시험으로 알아내기가 어렵기 때문에 지진이나 다른 가진에 대한 영향을 미리 평가하기가 매우 어려웠다. 그러나 근래에 들어 해석 기술이 발전함에 따라 건축물에 대한 성능을 예측해 볼 수 있게 되었다. 건축 구조물의 진동특성 예측은 지금까지는 2차원 평면 해석이 주를 이루었고, 3차원 해석은 이루어지지 않고 있었다. 2차원 해석은 건축물이 비대칭일 때 해석의 신뢰성을 떨어뜨리는 문제를 안고 있다. 본 논문에서는 주거 건축물을 3차원으로 모델링하였으며, 지하철 통과시 주거 건축물의 진동 해석을 수행하였다.

Abstract Since vibration properties of a building structure were not easy to find out through a test, it was very difficult to in advance evaluate an influence of earthquake or other excitations on the building structure. However, currently, along with the development of the vibration analysis technique, it is possible to predict the structural performances of the buildings. The prediction of the vibration properties of the building structure has mainly employed a two-dimensional plane analysis so far, but not a three-dimensional analysis. The two-dimensional plane analysis encounters a reliability problem when the building is asymmetrical. This study has performed a three-dimensional modeling and vibration analysis on residential buildings when a subway passes below.

Key Words : Building structure, Three-dimensional modeling, Subway, Vibration analysis

1. 서론

근래에 들어 건축물 진동에 대한 사람들의 관심이 여러 가지 이유로 증가하고 있다. 진동에 의한 불만을 찾아왔던 예전과는 다르게 그 불만을 표출하거나 또는 법정 다툼으로 표출하기도 하는 실정이다. 이는 예전에는 집이라는 것이 사는 데에만 그 의미가 축소되어 왔으나, 사람들의 생활이 풍요로워지면서 상대적으로 쾌적한 생활의 요구가 높아지고 있기 때문이다.

그에 따라 본인이 살고 있는 곳의 환경 소음 및 진동에 매우 민감하게 반응하고 있다. 지하철의 주행으로 발생하는 진동은 각 진동원의 경로가 매우 복잡하게 되어 있기 때문에 진동저감 대책을 세우는 것은 어려운 문제가 많다. 따라서 건축물에 미치는 기여도를 평가하기 위해 실험데이터를 근거로한 다양한 해석기법들이 연구되

어 왔다.⁽¹⁻⁵⁾

지금까지는 대형 건축물이나 아파트와 같은 경우에 설계를 위한 구조물의 하중 계산이나 간략한 2D 해석 모델에 의한 진동 계산 정도를 수행했다. 아직 우리나라에서는 본격적인 지진에 의한 구조물 진동, 차량에 의한 구조물 진동, 지하철에 의한 구조물 진동 같은 것을 해석적으로 접근하고 있지 못하고 있는 실정이다. 그 이유는 건축물에 대한 특성을 시험적으로 알아내기가 매우 어려운 점이 있어 해석의 신뢰도를 보장하기 힘들기 때문이다. 그러나 근래에 들어 다른 사업 분야에서 해석의 타당성을 많이 입증하고 있기 때문에 간접적으로 해석의 타당성을 입증할 수 있을 것으로 판단되고 있다. 본 논문에서는 주거 건축물의 3차원 모델과 그에 대한 진동 특성을 파악하고, 지하철에서 유발되는 진동이 주거 건축물에 미치는 진동 영향에 대하여 알아보고자 한다.

¹한틀엔지니어링

³한라대학교 기계자동차공학부

접수일 08년 08월 19일 수정일 08년 10월 14일

²인하공업전문대학 기계과

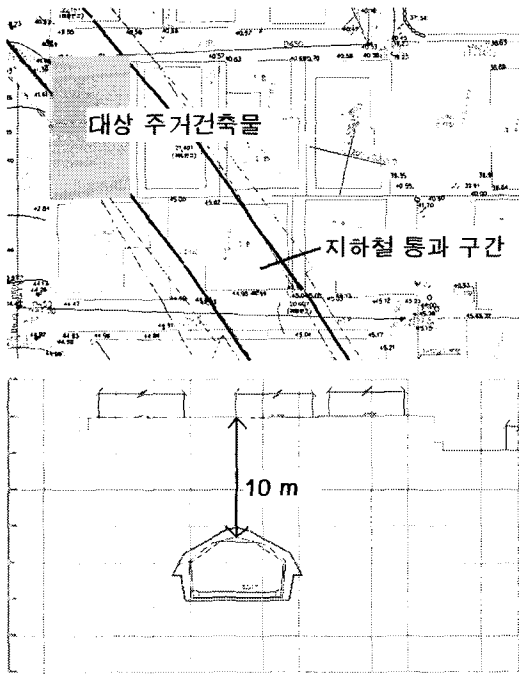
*교신저자: 박용석(yspark@inhac.ac.kr)

계재확정일 08년 10월 16일

2. 본 론

2.1 주거 건축물 환경

주거 지역에서 진동을 유발하는 요인으로는 자동차 통행에 의한 진동 소음, 공사장에서 유발되는 충격 진동 소음, 지하철 운행에 따른 진동 소음등이 있을 수가 있다. 이들 중 본 논문의 해석 대상물인 주거 건축물에 진동을 유발하는 환경 요인은 그 주거 건축물 아래로 지하철이 지나가면서 발생하는 진동이다.(그림 1)



[그림 1] 주거 건축물과 지하철 배치 개략도

지하철 선로의 위치는 주거 건축물에서 10m이상 아래쪽에 위치하고 있다. 그리고 지하철이 해석 대상 주거 건축물을 가로 지르면서 지나가고 있는 것을 알 수 있다. 주거 건축물과 지하철간의 거리가 많이 떨어져 있지만 주거 건축물을 가로 지르면서 지나가고 있기 때문에 지하철 진동이 주거 건축물에 미치는 영향을 파악할 필요가 있다.

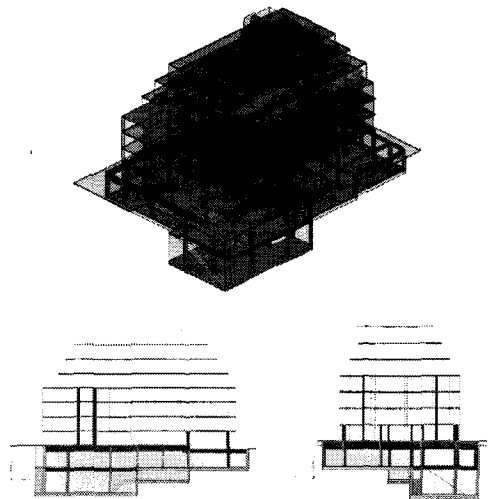
2.2 주거 건축물 및 지하철 구간 FE 모델링

본 논문에서 해석하고자 하는 주거 건축물은 아파트와 같이 정형화 되고 대칭적인 건물이 아닌 비대칭적인 건물이므로 3차원 모델링을 기본으로 하였다. 모델은 두 부분으로 나누어 FE모델링 하였다. 첫번째는 주거 건축물

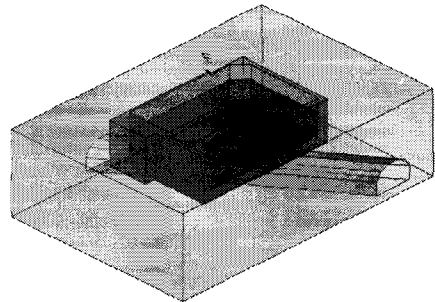
을 셀 요소와 솔리드 요소를 이용하여 그림 2와 같이 3차원 FE모델을 구성하였다. 이때 기둥과 벽은 2절 굽힘까지 고려하였다. 두 번째로, 지하철 구간 및 지반을 그림 3과 같이 솔리드 요소로 모델링하였다. 지반은 [표 1]과 같은 물성치를 갖는 연암, 풍화암, 매립토로 모델링하였다. 이렇게 구성한 두 가지 모델을 결합하여 진동 해석 모델을 구성하였다.

[표 1] 해석에 사용된 토양의 물성치

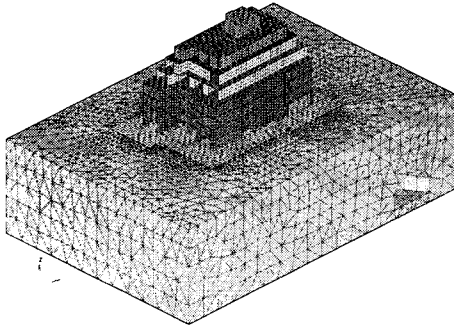
항목	매립토	풍화암	연암
단위중량[t/m ³]	1.89	2.10	2.48
탄성계수 [E×10 ³ [t/m ²]]	2.05	23.25	281.83
포아송비	0.40	0.35	0.27



[그림 2] 주거 건축물 3차원 모델



[그림 3] 지반 및 지하철 구간 3차원 모델

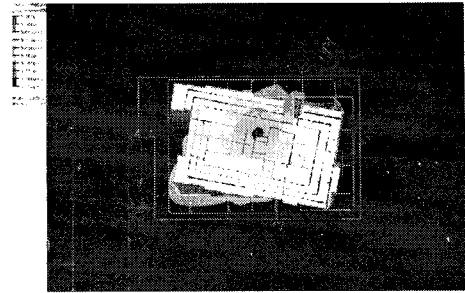


[그림 4] 해석 대상 전체 모델

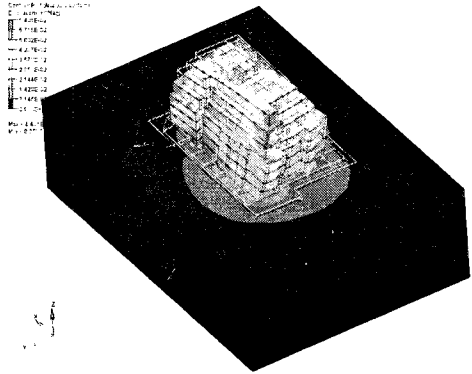
2.3 주거 건축물 진동 특성 분석

앞 절에서 구성한 모델을 이용하여 주거 건축물의 고유진동 특성을 파악하여 보았다. 경계 조건은 지반의 경계에 병진 운동만을 고정시켰다.

해석결과를 살펴 보면 4Hz의 저주파에서 첫 번째 모드가 발생하며, 이후 1Hz 미만의 간격으로 조밀하게 주파수가 분포하고 있다. 주요 모드는 처음 나오는 좌우, 전후로 흔들리는 모드와 건물자체가 비틀리는 모드이며, 이후의 모드 양상은 이들의 조합으로 나타나고 있다. 주거 건축물의 주요 모드들은 지진파나 지하철 진동에 큰 영향을 미치는 모드들로 판단된다.



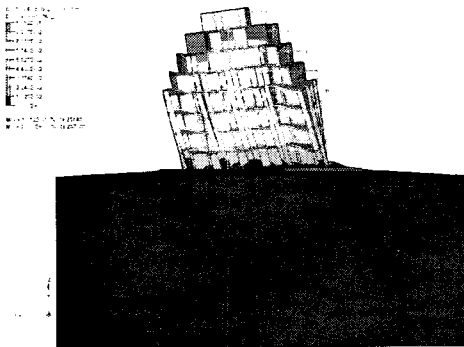
4th 모드 : 비틀림 모드



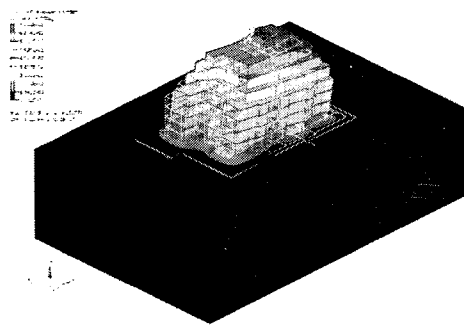
[그림 5] 주요 모드

[표 2] 고유주파수

모드No	1	2	3	4	5
주파수(HZ)	4.05	5.16	6.43	6.58	6.75
모드No	6	7	8	9	10
주파수(HZ)	7.24	7.85	7.90	8.42	8.57
모드No	11	12	13	14	15
주파수(HZ)	8.85	9.23	9.38	9.67	9.74
모드No	16	17	18	19	20
주파수(HZ)	9.83	10.0	10.3	10.3	10.5



1st 모드 : 좌우 모드



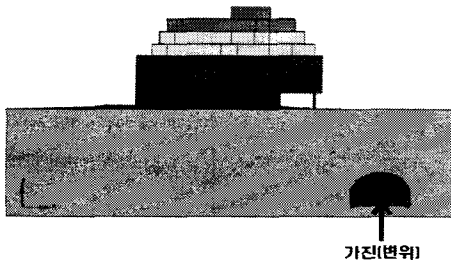
2nd, 3rd 모드 : 전후 모드

2.4 주거 건축물 가진 해석

지하철이 지나갈 때 발생하는 힘이 주거 건축물에 전달되는 것을 파악하기 위하여 LARGE MASS METHOD을 사용하여 해석하였다.

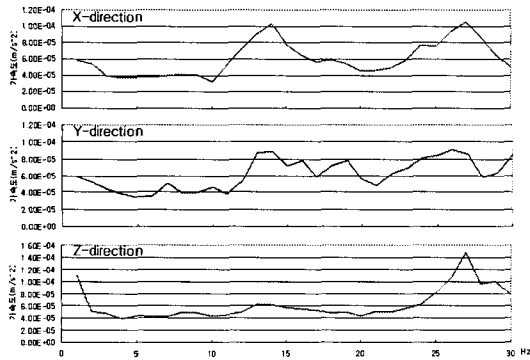
LARGE MASS METHOD는 대상물의 경계를 통하여 변위나 가속도 등이 전달될 때 사용하는 방법으로 가진을 가속도, 속도, 변위로 줄 경우와 경계를 통하여 가진이 전달될 경우에 대한 지진 해석, 건축물 진동 해석이 가능하다.

주거 건축물의 가진 해석을 하기 위하여 아래 그림 6과 같이 지하철 통과 부위를 한 점으로 묶고, 그 점에 변위를 주었다.



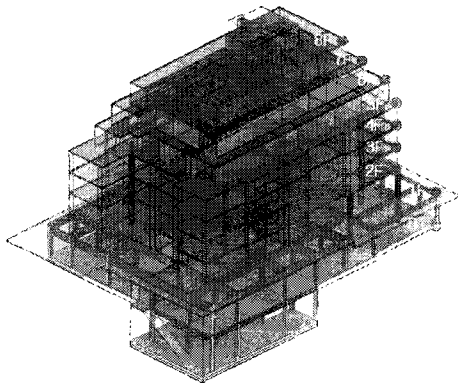
[그림 6] 가진 위치

가진 변위는 지하철 통과시 발생하는 변위이며, 이 변위값을 알 수 없기 때문에 지하철 통과 시 건물 1층 표면에서 측정한 가속도(그림 7)의 크기(Peak)를 묘사할 수 있는 변위를 사용하였다. 해석에 사용된 가진 변위는 그 크기를 바꾸어 가면서 반복적으로 해석을 수행하여 얻은 가속도 피크값과 시험으로 얻은 가속도 피크값이 5%이내 일 때의 변위이다.



[그림 7] 1층 표면 가속도 데이터

해석을 수행한 결과, 표 2와 같이 각 층별 진동 크기를 얻을 수 있었다.



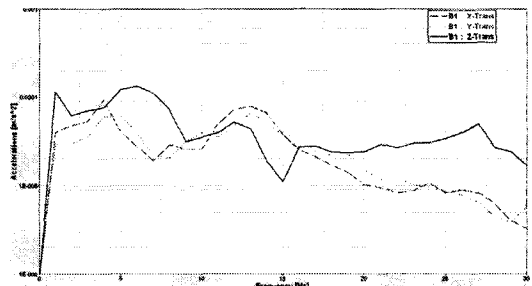
[그림 8] 응답 측정 위치

[표 3] 각 층별 진동 해석 결과

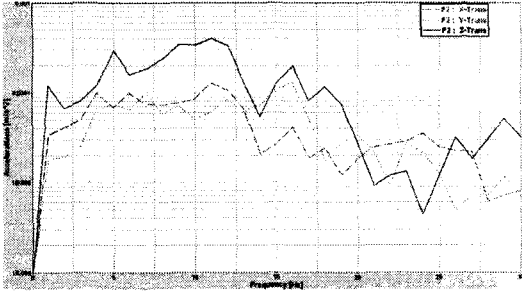
위치 및 방향	Vel (m/s rms)	Acc (m/s ²)	*dB(V)	dB
지반 - X	7.84E-03	3.47E-04	22.2	27.8
지반 - Y	8.04E-03	3.52E-04	22.3	27.9
지반 - Z	1.31E-02	3.69E-04	22.3	28.3
B1 - X	6.44E-03	2.05E-04	21.0	23.2
B1 - Y	4.73E-03	1.77E-04	19.7	21.9
B1 - Z	1.45E-02	3.17E-04	25.5	27.0
F1 - X	6.18E-03	2.26E-04	21.4	24.1
F1 - Y	4.47E-03	2.01E-04	20.8	23.0
F1 - Z	1.53E-02	5.00E-04	28.5	31.0
F2 - X	6.67E-03	3.08E-04	25.1	26.8
F2 - Y	4.64E-03	3.02E-04	24.0	26.6
F2 - Z	1.86E-02	9.18E-04	34.4	36.2
F3 - X	6.66E-03	3.30E-04	25.9	27.4
F3 - Y	3.86E-03	2.34E-04	22.6	24.4
F3 - Z	1.81E-02	8.44E-04	33.7	35.5
F4 - X	6.80E-03	3.56E-04	26.6	28.0
F4 - Y	3.25E-03	1.94E-04	21.4	22.8
F4 - Z	1.82E-02	8.55E-04	33.8	35.6
F5 - X	7.10E-03	3.89E-04	27.5	28.8
F5 - Y	3.02E-03	2.19E-04	21.5	23.8
F5 - Z	1.84E-02	8.54E-04	33.9	35.6
F6 - X	7.06E-03	3.62E-04	27.4	28.2
F6 - Y	2.91E-03	2.38E-04	21.7	24.5
F6 - Z	1.85E-02	8.28E-04	33.8	35.3
F7 - X	7.31E-03	3.68E-04	27.8	28.3
F7 - Y	3.02E-03	2.53E-04	21.9	25.1
F7 - Z	1.83E-02	7.63E-04	33.2	34.6
TOP - X	7.77E-03	4.10E-04	28.7	29.3
TOP - Y	3.25E-03	2.51E-04	22.0	25.0
TOP - Z	1.82E-02	7.32E-04	32.9	34.4

* dBV 는 소음진동 공정 시험법의 진동레벨에 따른 수치임(dBV는 현재 한국과 일본만 적용)

각 층별 진동 크기를 비교하여 보면 상층으로 올라갈수록 진동은 증가하지만, 2F과 5F에서 가장 진동이 크게 나타나고 있다. 이는 2F 측정지점이 수직 보로써만 지지되고 있기 때문에 다른 부분보다 상대적으로 취약하며, 5F의 경우는 층면적이 줄어들고 있기 때문으로 판단된다.

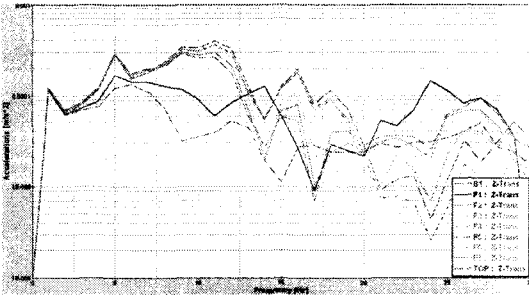


지하 1층



지상 2층
[그림 9] 방향 별 진동

각 방향 별 진동을 살펴보면 수평방향 응답 보다는 수직 방향의 응답이 큰 것을 알 수 있다. 이는 지하철이 지나갈 때 지진파와 다르게 주거 건축물에서 사람이 느끼는 진동은 상하방향이라는 것을 말해주는 것이다.



[그림 10] 층별 진동

그림 10을 살펴보면 지하층과 1층은 지반에서 측정된 양상과 비슷하게 나타나고 있다. 2층부터 최상층까지는 양상이 비슷하게 나타나고 있으며, 주거 건축물 고유진동 특성이 나타나고 있다. 특히 10Hz 대역에서 큰 진동이 나타나고 있음을 알 수 있었다.

2.5 주거 건축물 진동 평가

앞 절에서 해석한 결과를 가지고 본 논문의 대상인 주거 건축물의 진동에 대한 평가를 하여 보았다.

진동 평가 기준은 다음의 두 가지를 대상으로 하였다.

2.5.1 철도 소음 진동 규제 기준

환경부에서 공포하는 한국 소음진동규제법⁽⁷⁾에 따르면 철도의 소음과 진동규제는 다음과 같으며, 2009년 12월 31일까지 적용한다.

[표 4] 철도 소음진동 규제 기준

대상지역	구분	주간	야간
주거지역	소음 [Leq dB(A)]	70	65
	진동 [dB(V)]	65	60

※ 측정위치 : 옥외측정을 원칙으로 하며, 그 지역의 철도진동을 대표할 수 있는 지점이나 철도진동으로 인하여 문제를 일으킬 우려가 있는 지점

※ 측정방법 : 열차 통과시마다 최고진동레벨을 측정하여 기록하고 그 중 중앙값 이상을 산술 평균한 값을 철도 진동레벨로 한다

2.5.2 건물용도별 평가 기준(ISO-2631)⁽⁸⁾

[표 5] 건물 진동 규제 기준

구분	시간	연속진동	
		가속도RMS (m/s ²)	진동레벨 (dB)
주거	주간	0.072/√t	57
	야간	0.005	54

여기서 t는 진동노출시간(초)으로 t=100을 가정할 경우, 주거지는 7.2mm/s², 사무실은 14mm/s²을 적용하는 것이 일반적이다.

국내의 소음진동규제법에 따른 dBV를 적용할 경우, 최대 진동레벨은 5층 수직방향으로 33.9dBV이며 규제치 60dBV를 만족하고 있다. 또한 ISO 2631에 따른 진동가속도 레벨은 야간의 경우 54dB로 2층 수직방향에서 발생하는 최대진동이 36.2dB로 규제기준을 만족하고 있다.

두 기준 모두 야간에 진동 규제가 더 심한 것을 알 수 있으며 현재 대상 주거 건축물은 규제레벨 이하로 진동이 거의 느껴지지 않는 수준임을 알 수 있다.

3. 결 론

해석을 통해 비 대형 주거 건축물의 진동을 예측하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 본 논문의 주거 건축물은 지하철 통과 시 건축물에 미치는 진동 영향이 아주 작다고 볼 수 있다.
- (2) 주거 건축물의 고유모드가 지하철 가동에 의한 진동에 영향을 미치고 있다고 판단 된다.
- (3) 지하철 통과 시 본 논문의 주거 건축물에 가장 크게 영향을 미치는 주파수는 10Hz 대역으로 판단된다.

참고문헌

[1] Shrader J. E. (1937), "Investigation of Vibration of City Hall in Philadelphia and of the Subway Structure Beneath," *Journal of the Franklin Institute*, Vol. 224, No. 6, pp.757-765.

[2] Oh J. E., Kang H. J and Cha I. W.(1985), "A Study on Estimation of Contribution for Noise of Rail of Subway and Locomotive," *Journal of the Acoustical Society of Korea*, Vol. 4, No. 3, pp.21-32.

[3] Kim H. C., Lee D. G. and Min K. W.(1995), "Dynamic Response of Building Structures Induced by Subway Operation," *Journal of the Computaional Structural Engineering Institudes of Korea*, Vol. 8, No. 1, pp. 95-106.

[4] Hayakawa K.(2000), "Ground Vibration Reduction due to Improvement of Track in Subway," *Journal of Construction Management and Engineering*, No659. pp.17-26.

[5] Guohui C., Zhi F., Ermin M. and Weiqiong M., (2003), "Research on Building's Vibraton Created by Subway Running," *Industrial Construction*, Vol. 33, No. 12, pp. 31-33.

[6] David N. Herting(1997), *Basic Analysis User's Guide*, MSC..

[7] 소음진동규제법, 철도에 대한 교통소음진동규제지역의 범위와 한도.

[8] ISO 2631-2(2003), *Mechanical Vibration and Shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part2 : Vibration in Building(1Hz to 80Hz)*.

박 용 석(Yong-Suk Park)

[정회원]



- 1986년 2월 : 인하대학교 기계공학과(공학사)
- 1988년 2월 : 인하대학교 대학원 기계공학과(공학석사)
- 1996년 2월 : 인하대학교 대학원 기계공학과(공학박사)
- 1995년 3월 ~ 2004년 2월 : 대전전문대학 부교수
- 2004년 3월 ~ 현재 : 인하공업전문대학 기계과 부교수

<관심분야>
진동제어, 동역학, 구조해석

홍 성 철(Sung-Chul Hong)

[정회원]



- 1981년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학사)
- 1987년 9월 : 인하대학교 기계공학과 (공학석사)
- 1992년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학박사)
- 1995년 3월 ~ 현재 : 한라대학교 기계자동차공학부 교수

<관심분야>
진동 및 구조동역학, 비선형진동

서 정 범(Jeong-Beom Seo)

[비회원]



- 1991년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학사)
- 1993년 2월 : 인하대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 1993년 2월 ~ 2005년 2월 : 현대자동차 선행해석팀
- 2005년 3월 ~ 2006년 12월 : 알테어엔지니어링 구조팀장
- 2007년 1월 ~ 현재 : 한틀엔지니어링 대표

<관심분야>
NVH 해석, 내구해석, 시스템 개발, 신기술개발