

## 극한값으로부터의 최적화를 이용한 그루브를 통한 표면형상변형 동특성 변경법 검증

박미유<sup>1\*</sup>, 성락훈<sup>2</sup>

### Verification of Structural Dynamics Modification Using Surface Grooving Technique : Using Optimization with Fully Embossed HDD cover model

Mi-You Park<sup>1\*</sup> and Rock-Hoon Sung<sup>2</sup>

**요약** 구조물 동특성 변경법이란 부가 구조물의 첨가나 삭제, 재료 물성치의 변경, 구조물의 형상변경 등을 이용해 구조물의 동특성을 향상시킬 수 있는 매우 효과적인 방법이다. 하지만 이러한 구조물 동특성 변경법 중 구조물의 형상 변경을 통해 그 구조물의 동특성을 향상시키는 방법은 지금까지는 주로 엔지니어의 경험이나 많은 시간을 요하는 시행착오법에 의존해 왔다. 따라서, 앞선 연구를 통해 이러한 구조물의 형상 변경을 통한 동특성변경법에 있어서 기존의 경험이나 시행착오법에 의존하는 방법이 아닌, 체계화된 방법론을 제안하게 되었으며 하드디스크 드라이브(HDD)에 성공적으로 적용하였다. 제안된 그루브를 통한 표면형상변형 동특성변경법을 검증해 보기 위하여, 본 연구에서는 모든 요소가 엠보싱 되어 있는 극한의 경우로부터 최적화를 수행하고 앞선 연구에서 얻어진 최적화 결과와 비교함으로써 제안된 방법론의 효과를 검토해 볼 수 있었으며, 1차 고유진동수를 높이기 위한 최적화 결과 그루브의 형상은 앞선 연구결과와 같음을 알 수 있었다.

**Abstract** Structural Dynamics Modification (SDM) is a very effective technique to improve structure's dynamic characteristics by adding or removing auxiliary structures, changing material properties and shape of structure. Among those of SDM technique, the method to change shape of structure has been mostly relied on engineer's experience and trial-and-error process which are very time consuming. In order to develop a systematic method to change structure shape, surface grooving technique is studied and successfully applied to HDD cover model. To verify Surface Grooving Technique, fully embossed HDD cover model was optimized. And comparing with previous optimization result, the effectiveness of this surface grooving technique was checked. The shape of groove and 1st natural frequency were converged to the same result of previous optimization.

**Key Words** : Structural Dynamics Modification(구조물 동특성 변경법), Groove(임의의 형태를 갖는 홈), Criterion Factor(기준 계수), Embossing(엠보싱)

## 1. 서론

구조물 동특성 변경법(SDM : Structural Dynamics Modification)이란 고유진동수, 모드형상, 주파수 응답함수 등과 같은 구조물의 동특성을 향상 시키기 위해서 행해지는 광범위한 연구를 일컫는 용어로서[1], 크게 부가 구조물을 첨가하는 방법과 삭제하는 방법, 재료의 물성치

를 변경하는 방법, 구조물의 형상을 바꾸는 방법 등으로 분류할 수 있다.

이러한 구조물 동특성 변경법의 한 종류로서 구조물의 형상 자체를 변경하는 형상최적설계와는 달리 유한요소의 재구성을 통하지 않고 빔을 이용해서 대상구조물에 엠보싱(Embossing)이 주어진 것과 같은 효과를 주는 비드 패턴 최적화(Bead Pattern Optimization) 방법[2]이 있

<sup>1</sup>국방기술품질원 선임연구원

\*교신저자: 박미유(lostmu@cmpal.com)

접수일 08년 09월 04일

수정일 (1차 08년 12월 01일, 2차 08년 12월 19일)

게재확정일 09년 01월 16일

<sup>2</sup>아주자동차대학 자동차기계계열 부교수

는데 이 방법은 비록 시행착오법(trial-and-error process)에 크게 의존하던 기존의 방법과 달리 많은 부분에 있어 체계화(Systematic) 되었으나, 위상 최적화 과정 후 비드 패턴을 구하는 과정에 있어서 여전히 엔지니어의 주관적 판단에 의존하게 되는 경향이 있고 이에 따라 정확한, 임의의 형상을 갖는 비드 패턴을 얻기가 어렵다.

따라서 그루브를 이용한 표면형상변형 동특성 변경법에 대한 연구는 구조물의 형상 변경을 통한 구조물 동특성 변경법의 일환으로서 대상 구조물에 작은 크기의 엠보싱을 여러 개 갖게 하여 임의의 형태를 갖는 그루브 형상(Groove shape)을 만들어 구조물의 고유진동수를 높이는 것을 목적으로 하는 것이다.

이를 위해 대상 구조물을 구성하는 각각의 요소에 대한 고유진동수의 변화(variation)를 계산하고 이를 바탕으로 일정 범위에 해당하는 변화(variation)를 갖는 요소에 작은 크기의 엠보싱이 생기게 하는 알고리즘을 개발하였고[3], 이를 실제 제품인 컴퓨터의 하드디스크 드라이브(HDD) 커버 모델에 적용하여, 첫 번째 고유 진동수를 증가시키기 위한 임의의 형태를 갖는 그루브 형상을 얻게 하였다[4]. 또한 이 때 얻어진 체크 무늬 그루브의 효용성을 알아보기 위하여 패속 조형(RP : Rapid Prototype) 방법을 이용하여 HDD 커버를 직접 제작하여 실험을 실시하였다. 실험 결과로 얻어진 체크무늬 그루브가 고유진동수를 증가시키는데 있어서 더 효율적이었다는 것을 알 수 있었다. 또한 초기 시작점을 선택하는데 있어서 고유치를 이용하는 방법과 모달 스트레인 에너지를 이용하는 방법 중 어느 것이 계산 효율을 높이는 관점에 있어서 더 유리한지를 비교 분석해 보았다[5].

그 후 추가적인 연구[6]를 통해 먼저 요소의 크기가 작은 모델(fine HDD cover FEmodel)을 만들고 모의실험(simulation)을 실시해서 요소의 크기가 다름에도 불구하고 동일한 결과를 얻는다는 것을 알아봄으로써 개발된 기법이 유한요소모델의 요소 크기에 상관없다는 것을 확인해 보았다. 또한 대상 구조물의 표면에 그루브를 생기게 함으로써 구조물의 동특성을 개선하는 방법을 제시한 앞선 연구[3,4,5]의 단점이었던 많은 계산량으로 말미암은 많은 계산 시간의 단축을 위해 개선된 알고리즘을 개발하였다. 개선된 알고리즘을 적용한 모의실험 결과를 크게 높일 수 있었다[6,7].

본 논문은 지금까지의 연구를 통해 얻어진 결과를 유한요소 모델을 이용하여 검증해 보기 위해 진행한 연구에 대한 것으로서, 구체적으로는 디자인 영역 내에 있는 모든 요소들에 엠보싱이 가해진 상태에서 시작된 최적화가 본 연구에서 제안한 방법을 거쳤을 때에도 앞에서 얻어진, 즉 엠보싱이 전혀 없는 상태에서 시작된 최적화 결

과와 동일한지를 검토해 본 것이다. 이를 통하여 어떤 초기 상태에서 최적화를 시작하더라도 글로벌한 최적점(Global Optimum)으로 수렴해 갈 수 있다는 것을 검증해 볼 수 있었다.

## 2. 본론

### 2.1 그루브를 이용한 표면형상변형 동특성 변경법

#### 2.1.1 기준계수(Criterion Factor : CF )

본 연구의 목적은 임의의 위치에서 임의의 형상을 갖는 임의의 개수의 그루브 형상을 대상구조물에 만들어서 구조물의 첫 번째 고유진동수를 증가시키는 것이다. 이를 위해 먼저 대상구조물을 작은 요소(element)로 나누고(mesh generation), 각 요소에 대한 민감도 해석(sensitivity analysis)을 실시하여 이를 바탕으로 일정 범위에 해당하는 민감도를 갖는 요소에 작은 크기의 엠보싱을 생기게 한다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\alpha_e \geq CF \cdot \alpha_{Max}$$

$$\alpha_e : \text{Embossing Variation}$$

$$\alpha_{Max} : \text{Max. Variation}$$

$$0 < CF < 1$$

여기서 CF (Criterion Factor)는 기준 계수라고 하며 특정 요소의 엠보싱 유무를 결정짓는 기준이 된다. 즉, 최대 변화율의 일정 비율 이상이 되는 변화율을 갖는 요소 전부에 엠보싱이 생기게 하는 것이다. 또한 기준 계수를 고정된 값이 아닌 상황에 따라 변화하는 가변 기준 계수로 만들어 효율을 높였다.

이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$CF = F_0 - F_1 \cdot (0.1)^{SN} - F_2 \cdot ON$$

$$F_0 : \text{Global State Const.}$$

$$F_1 : \text{Initial State Const.}$$

$$F_2 : \text{Oscillation State Const.}$$

여기서 SN은 단계 지수(Step Number)로서 0에서 시작하여 매 단계마다 1씩 증가하게 되는 것으로서 CF에 0과 1일 때만 영향을 미치게 되고 그 외에는 거의 영향을 미치지 않는다. 즉, 처음에 엠보싱을 갖는 기준을 상당히 느

순하게 하여 임의의 위치에서 임의의 개수에 해당하는 엠보싱이 생기게끔 해주는 것이다. 또한, ON은 오실레이션 지수(Oscillation Number)로서 한 요소에 엠보싱이 생기고 다음 단계에서 다시 그 요소의 엠보싱이 제거되는 오실레이션 상태(Oscillation State) 등에 빠졌을 시 이를 탈출하기 위한 것이다. 즉, 오실레이션 상태가 아닐 때에는 0으로 있다가 오실레이션 상태에 빠지게 되면 1씩 증가하면서 그 상태를 탈출했는가를 검토하는 것이다. 만약 오실레이션 상태를 탈출하지 못했다면 일정범위까지 계속 1씩 증가되고 탈출 하였다면 다시 0이 된다.

이런 단계가 진행됨에 따라 작은 엠보싱이 여러 개 모여 임의의 형상을 갖는 그루브 형태를 이루게 되었고 이를 통해 대상구조물의 고유진동수를 크게 증가시킬 수 있었다.

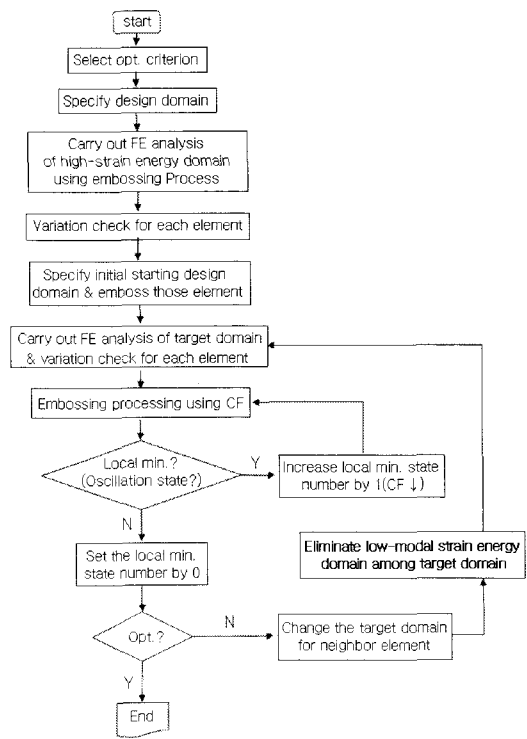
### 2.1.2 주변부 요소를 대상으로 한 민감도 해석

민감도 해석을 할 때 대상구조물의 가능영역 전체를 대상으로 민감도 해석을 수행하면 계산량이 많아지게 되어 효율이 떨어지게 된다. 이에 본 연구에서는 어느 부분이 엠보싱에 민감한가를 알아보는 첫 단계에서만 전체 영역을 대상으로 민감도 해석을 수행하고 그 이후부터는 이미 생겨난 엠보싱의 주위만을 대상으로 한 민감도 해석을 수행하였으며 이를 통해 계산 량을 상당히 줄일 수 있었다.

### 2.1.3 최적화 순서(알고리즘)

최적화 알고리즘은 다음과 같다. 우선 대상 구조물의 디자인 영역에 대하여 모달 스트레인 에너지(Modal Strain Energy)를 계산하고 높은 모달 스트레인 에너지(Modal Strain Energy)를 갖는 요소에 엠보싱이 생기게 하고 그 시착점 주위의 주변부 요소에 대하여 엠보싱 작업을 실시한다. 그 후 생성된 엠보싱의 주변부 요소에 엠보싱이 생겼을 때의 민감도(Sensitivity)를 계산하고 그 요소들 중 높은 민감도를 갖는 요소에 엠보싱이 생기게 한다. 그 후 계속해서 이러한 과정을 반복해 나감으로써 최적의 그루브를 형성시켜 나간다. 이 때 최적화 과정 중 부분 최적 상태(Local min.)에 빠졌으면 기준계수를 상향에 맞게 변경 시킨다.

또한 목표영역을 구성할 때 주변부 요소(neighboring element) 중 모달 스트레인 에너지(modal strain energy) 값이 낮은 요소는 제외를 함으로써 계산량을 줄였다. 이에 대한 순서도는 그림 1과 같다.

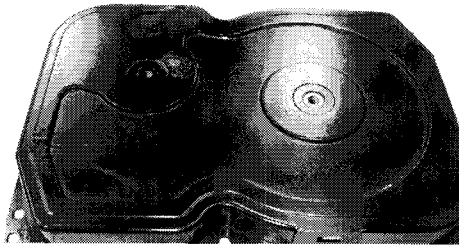


[그림 1] 순서도

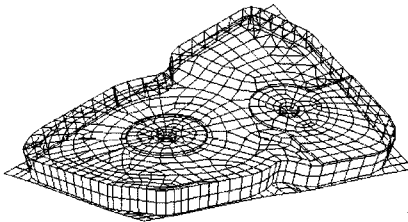
## 2.2 문제정의

대상 구조물은 그림 2와 같이 HDD의 커버모델로서 그림 3에서와 같은 자유단 경계조건을 갖는 두께 1mm의 유한요소모델(FE model)로 구성하였다. 1차 고유진동수는 비틀림 모드의 249.64Hz였다. 그림 4는 HDD 커버 모델을 수직으로 내려다 본 모습으로서 흰색 부분이 엠보싱을 할 수 있는 변형 대상 영역(Design domain)이다. 가운데의 원형부분은 디스크의 회전을 제어하는 스피들 모터(Spindle motor) 때문에, 오른쪽 아랫부분은 헤드의 위치를 제어하는 VCM(Voice Coil Motor) 때문에 공간상의 기하학적 제약이 생겨 변형 대상 영역에 포함되지 못하였다. 이번 연구에서는 그림 5에서와 같이 디자인 영역 내에 있는 모든 요소에 엠보싱이 생기게 한 후 앞선 연구 [6]에서 적용한 개선된 알고리즘을 적용하였다.

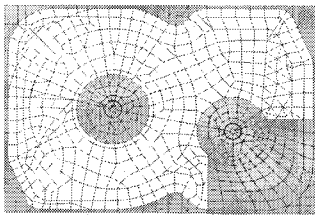
엠보싱 된 높이는 컴퓨터 슬롯의 제한을 고려하여 1mm로 하였다. 최적화는 1차 고유진동수를 최대로 올리는 것을 목표로 수행하였다.



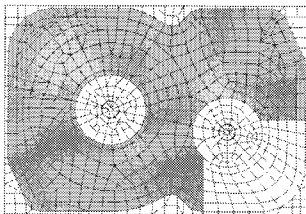
[그림 2] HDD 커버



[그림 3] HDD 커버 유한요소모델



[그림 4] 디자인 영역(흰색표시부분)

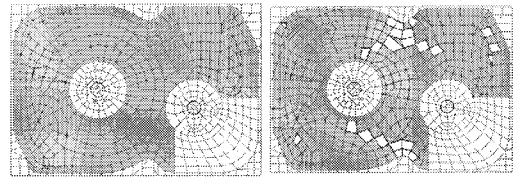


[그림 5] 대상 모델

### 2.3 최적화 결과

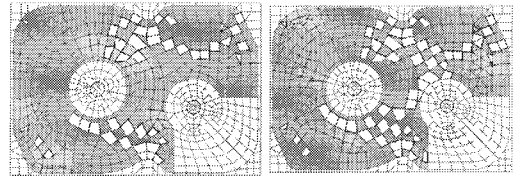
이번 연구에서는 초기점을 선정하기 위한 특별한 단계가 없다. 이는 최적화 시작단계가 이미 디자인 영역 내의 모든 요소가 엠보싱 되어 있는 상태이기 때문이기도 하지만, 매 단계마다 디자인 영역 전체를 대상으로 최적화를 수행함으로써 국부 최적화 (Local Minimum) 상태에 빠지지 않게 하기 위함이기도 하다.

그림 6은 최적화 결과를 단계별로 나타내는 것으로서, 그림에서와 같이 이미 생성된 엠보싱이 없어지게 되었다.



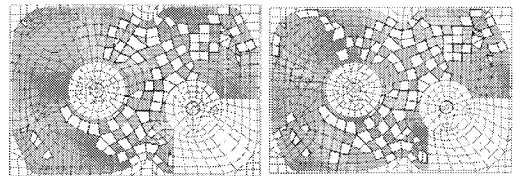
(a) SN=0

(b) SN=10



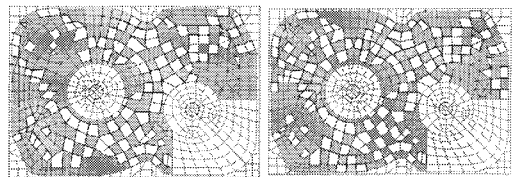
(c) SN=20

(d) SN=30



(e) SN=40

(f) SN=50

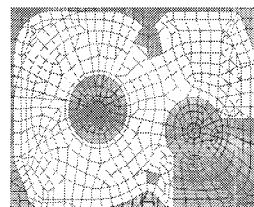


(g) SN=60

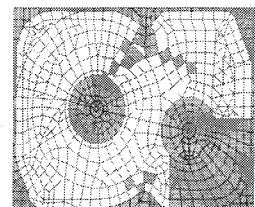
(h) SN=70

[그림 6] 각 단계별 형상  
(이번 연구를 통해 도출된 결과)

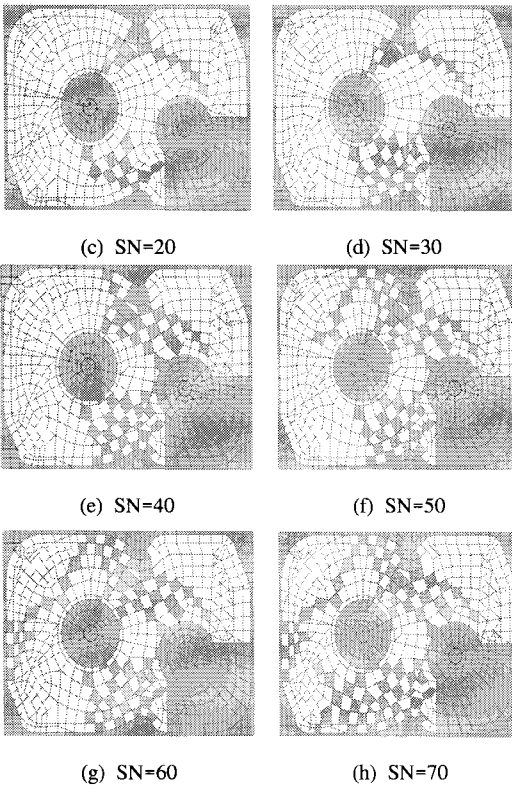
앞선 연구 결과는 그림 7에 나와 있는데 엠보싱이 없어지는 것이 앞선 연구결과와 상당히 흡사하게 진행한다는 것을 알 수 있다. 이는 현재 디자인 영역 내의 모든 요소들이 +Z 방향으로 엠보싱이 되어 있기 때문에 그 엠보싱이 없어지는 것이 -Z 방향으로 어느 요소도 엠보싱이 되어 있지 않은 상태에서 엠보싱이 생기는 것과 같은 효과를 가져오기 때문이다.



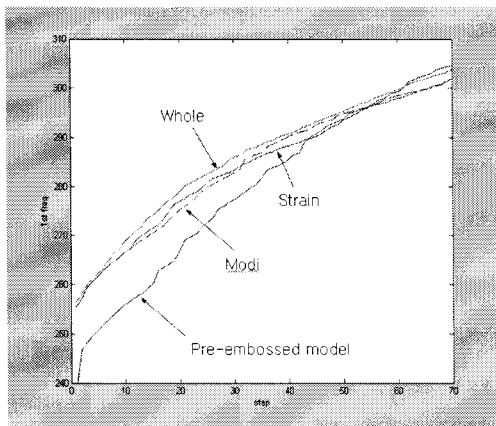
(a) SN=1



(b) SN=10



[그림 7] 각 단계별 형상 (지난 연구를 통해 도출된 결과)



[그림 8] 1차 고유진동수의 단계에 따른 변화

단계별 1차 고유진동수의 증가량은 그림 8과 같다. 그림 8은 앞선 연구[3.4.5.6.7]에서 디자인 영역 전체를 대상으로 최적화를 수행한 경우('whole')와 스트레인 에너지를 이용하여 최적화를 수행한 경우('strain'), 효율을 높이기 위하여 알고리즘을 개선한 경우('modi') 각각의 결과

와 비교한 것으로서, 디자인 영역 내의 모든 요소들이 엠보싱이 되어 있기 때문에 강성이 낮아져 초기 상태의 1차 고유진동수는 238.85Hz로 엠보싱이 전혀 생성되지 않은 상태의 249.64Hz보다 오히려 낮았으나, 그림 8에서와 같이 최적화가 진행되어 감에 따라 다른 조건하에서의 최적화와 마찬가지로 글로벌한 최적점(Global Optimum)으로 수렴해 감을 알 수 있다.

### 3. 결론

본 연구는 이전 연구를 통해 얻어진 최적화 결과가 글로벌한 최적점이 맞는지 검증해 보기 위하여 진행한 것으로서, 이전 연구에서 적용한 초기 시작 상태와 정반대인 초기 시작 상태를 적용하였다.

즉, 디자인 영역 내의 모든 요소에 엠보싱이 가해져 있는 극한 상태에서 시작된 최적화가 본 연구에서 제안한 방법을 거쳤을 때에도 앞에서 얻어진, 즉 엠보싱이 전혀 없는 상태에서 시작된 최적화 결과와 동일한지를 검토해 본 것이다.

이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 본 연구에서와 같이 어떠한 초기 상태에서 최적화를 시작하더라도 글로벌한 최적점 (Global Optimum)으로 수렴해 갈 수 있다는 것을 검증할 수 있다.
- 2) 대상 고유진동수 역시 최적화를 진행함에 따라 최적점으로 수렴해 간다는 것을 확인해 볼 수 있다.

### 참고문헌

- [1] Park, Y. S. and Park, Y. H.(1999), "Research Areas on Structural Dynamics Modifications and Its State of the Art", Proceedings of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, pp.15~31
- [2] R. J. Yang, C. J. Chen, C. H. Lee(1996), "Bead Pattern Optimization", Structural Optimization 12, pp.217~221
- [3] 박미유, 박영진, 박윤식(2004), "임의의 형태를 갖는 홈을 이용한 표면형상변형을 통한 동특성 변경" 춘계학술발표회 논문집, 한국소음진동공학회, pp.859~863
- [4] 박미유, 박영진, 박윤식(2004), "그루브를 이용한 표면형상변형 동특성 변경법:HDD 커버에 대한 적용" 한

국소음진동공학회 추계학술발표회 논문집, pp.826~829

- [5] 박미유, 박영진, 박윤식(2005), "그루브를 이용한 표면형상변형 동특성 변경법:체크무늬 그루브의 효용성과 초기 시작점의 선택 알고리즘에 대한 비교", 한국소음진동공학회 추계학술발표회 논문집, pp.128~131
- [6] 박미유, 박영진, 박윤식(2005), "개선된 알고리즘을 이용한 그루브를 통한 표면형상변형 동특성 변경법", 한국소음진동공학회 추계학술발표회 논문집, pp.834~837
- [7] M.Y. Park, Y.J. Park and Y.S. Park(2007), "Raising Natural Frequencies of a Structure via Surface Grooving Technique", Structural and multidisciplinary optimization : journal of the International Society for Structural and Multidisciplinary Optimization v.34 no.6, pp.491-505

---

**박 미 유**(Mi-You Park)

[정회원]



- 2000년 2월 : KAIST 기계공학과 (계계공학 석사)
- 2006년 2월 : KAIST 기계공학과 (계계공학 박사)

<관심분야>  
소음/진동제어, 조선

---

**성 락 훈**(Rock-Hoon Sung)

[정회원]



- 1990년 2월 : KAIST 기계공학과 (기계공학 석사)
- 2004년 8월 : KAIST 기계공학과 (기계공학 박사 수료)

<관심분야>  
소음/진동제어, 충돌해석