

# 건축물 조립성 및 분해성의 역학적 정량평가를 위한 가속도계의 적용성 분석

## Application of Accelerometer for Quantitative Mechanical Evaluation of Assembly and Disassembly Properties of Building

안 재 철\*

Ahn, Jaecheol\*

Department of Architecture, Dong-A University, Saha-Gu, Busan, 604-714, Korea

### Abstract

Recently mechanization construction methods are developed rapidly in the field of construction processing. The construction industry is one of the sector that still requires a lot of manual labor of the entire industry. There are still various kinds of work done by human labors, especially in the disassembling and separation of materials for recycling. However, database of relevant statistics including estimating standards are difficult to analyze by actual human workload, and furthermore the disassembling processes are being analyzed by qualitative assessment. This study attempted to introduce the accelerometer for the quantitative evaluation of human workload in the construction field. Still, it is possible to calculate the amount of energy which is required for the assembling and disassembling of nail and screw through three-dimensional accelerometer.

Keywords : assembly property, disassembly property, labor energy, accelerometer

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 목적

현재의 건설행위는 변화하는 환경 속에서 건축디자인과 재료를 토대로 인간과 기계노동에 의한 다양한 구·공법으로 실현되어져 왔다. 이에 따라 건설 구·공법은 품질의 확보 측면뿐만 아니라 시공성의 개선을 위한 다양한 연구개발이 이루어져 왔다. 때로는 인간의 노동에 의존해 온 목재와 석재 등의 재료와 조적 등의 구·공법은 시장에서 점차 도태되거나, 공장 제작 또는 외국에서의 현지 가공 등의 새로운 생산·공급체계를 모색해 왔다. 그리고 이러한 인

간과 기계의 노동이라는 투입에너지는 공정 및 원가 등의 관리를 위하여 적산자료를 통해 통계적 방법으로 데이터베이스 구축이 이루어져 왔으며, 관련 기술의 발전에 따라 지속적인 연구와 수정이 이루어지고 있다.

그러나 어떠한 분야의 산업에 종사하는 인간의 노동량의 측정은 또 하나의 필요성을 가진다. 특히, 3D업종으로 대표되는 건설 분야에서 가장 필수적인 인간의 노동행위를 어떻게 정량화할 것인가는 단순한 투입 자본의 관리 측면에서의 노동량 산출뿐만 아니라 인간의 직업으로서 건설노동의 질적 가치를 평가하는 데에도 중요한 의미를 가진다.

과거 생존을 위한 고소득의 직업으로서의 노무행위는 삶의 질의 향상에 따라 국내에서는 이미 기피대상의 직업이 되었으며, 이에 따라 많은 외국인 노동자의 유입과 다양한 구·공법의 개발로 이어지고 있다. 쾌적한 삶의 영위를 위한 직업으로서 건설노무의 현실을 정확히 파악하고 단순히 저소득층의 생존을 위한 직업적 패러다임에서 탈피해야 하는 것이 새로운 세기를 맞이하는 건설 환경의 변화의 가장

Received : October 22, 2014

Revision received : November 28, 2014

Accepted : January 15, 2015

\* Corresponding author : Ahn, Jaecheol

[Tel: 82-51-200-0948, E-mail: jcan222@dau.ac.kr]

©2015 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

주된 요인이기도 하다.

따라서 본 연구에서는 운동량의 평가가 용이한 3차원 가속도계를 활용하여 건축시공시 기본적으로 수반되는 조립 및 분해의 용이성을 노동 에너지를 토대로 역학적으로 평가하기 위한 가능성을 고찰하는데 목적이 있다.

### 1.2 연구의 방법 및 범위

본 연구에서는 조립성 및 분해성의 역학적 정량평가 가능성을 고찰하기 위한 기초적인 데이터를 얻는 것을 목적으로 한다. 이를 위하여, 다양한 시공 행위시 노동량의 정량 평가에 적용 가능한 신체활동량 측정에 대한 이론적 고찰을 수행하였다. 그리고 실험을 통해 조립 및 분해에 있어서 단위 행동에 소요되는 시간과 가속도의 조합에 의해 투입 에너지량을 산출하였다. 본 연구에서는 인간 활동량의 평가 방법으로 경량으로 다양한 작업환경에서 활용이 가능한 가속도계의 적용성을 분석하였으며, 간단한 건식 시공법의 사례를 통하여 측정 도구로서의 타당성을 고찰하였다.

## 2. 건축물의 조립성 및 분해성 정량분석

### 2.1 건축물 조립성과 분해성의 역학적 정량평가

건축물의 시공행위에 따른 인력투입 및 에너지에 대한 정량평가는 건축물의 라이프사이클 전반에서 환경배려설계(DfE ; Design for Environment)를 수행하고 그 가치를 정확히 분석·평가하기 위한 노력으로부터 기인하였다.

Figure 1과 같이 환경배려설계를 위해서는 재활용이 가능하거나 재활용된 재료의 사용이 필수적이며[1], 이를 위해서는 유지관리와 업그레이드에 수반되는 재료 및 부품의 추출 및 교체의 용이성, 즉 분해성이 확보된 접합부의 설계가 중요시된다. Figure 2와 같이 현재 전 산업분야에 있어서 조립과 분해의 용이성, 즉 조립성과 분해성의 평가를 가장 널리 활용하고 있는 분야는 전자 및 기계 산업으로, 해외에서는 이미 부품의 추출과 재사용, 그리고 이를 통한 제품 업그레이드와 장수명화를 위하여 조립 및 분해시의 작업자의 동작수와 시간을 모델화하고, 데이터로서 수집하여 평가하는 연구를 수행하고 있다.

건축분야에서는 Doi et al.[2]은 가변형 주택의 인필부재 교체에 있어서 가변성을 검토하기 위한 시공성 평가에서 작업별 공수(人·分)를 산출하였으며, Yang[3,4]은 단독

주택 생산 프로세스에 따른 사용에너지의 평가방법을 도출하기 위하여 제조단계, 시공단계, 사용단계, 해체단계로 나누어 각각의 조립 및 분해에 따른 환경부하를 평가하였다. 이 때 조립성 및 분해성의 평가는 전자제품의 경우와 유사하게 각 부재와 부재간의 접합방법에 따른 레벨을 정하여, 각 레벨의 조립등급과 분해동작수를 단위 점수로 이용하여 종합적으로 평가하였다.

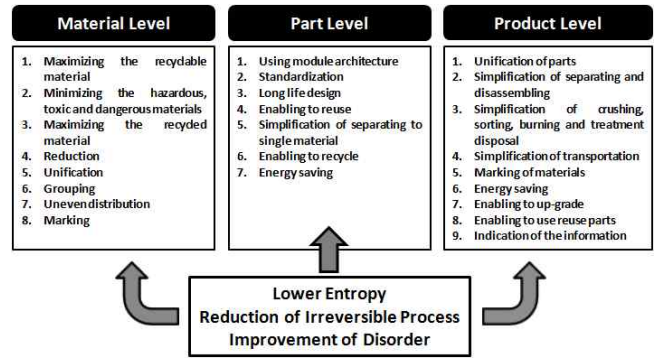


Figure 1. Material and part design for DfE[1]

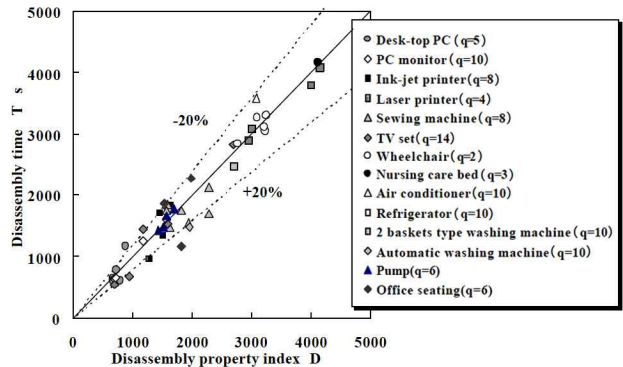


Figure 2. Disassembly time and disassembly property index[1]

현재, 콘크리트나 철골 등의 구조체 이외의 많은 건축재료의 해체(분해) 작업은 주로 수작업에 의하는 것이 대부분이며, 선진국의 건설 리사이클 관련 법규에서는 혼합폐기물의 발생을 가능한 줄이기 위하여 내장재 및 건축설비의 해체는 수작업으로 할 것을 정하고 있다. 그러나, 환경부하 평가에 있어서 이러한 해체과정에서의 분해성을 정량적으로 평가하는 방식에 관한 기존의 연구는 전무하다. 특히, 해체 시간 및 해체 에너지에 대한 평가가 없이, 「해체하기 어려움」 등의 정성적인 평가로서 정의되고 있는 경우가 대부분이다. 따라서, 해체에 관한 품셈을 결정하거나 환경부하량을 검토하는데 있어서 재현성이 있는 데이터로서 신

뢰성이 높지 않은 것이 현실이다.

또한, 건설 분야는 타 산업에 비하여 재료 및 부품의 중량과 부피가 크고 작업범위가 넓다. 또한, 시멘트계 접합 및 합성수지계 접합과 같이 다양한 환경에 저항하는 강고한 접합방법이 널리 이용되고 있어, 접합부의 분리에 있어서 많은 노동에너지가 소모된다. 따라서 건설분야에서는 전자제품의 사례와 같이 단순히 해체공정의 수 및 시간의 측정에 의한 분해성 평가에는 다소 어려움이 있을 것으로 생각된다. 또한, 과도한 신체노동은 건설현장에서의 작업환경의 안전성 및 쾌적성에도 큰 영향을 미치게 된다.

## 2.2 신체활동량의 역학적 정량평가

신체활동(physical activity)이라는 용어는, 에너지 소비를 초래하는 골격근에 의한 모든 신체의 움직임을 나타내며, 운동은 물론, 가사, 작업 등 모든 활동을 총괄한 것으로 정의된다. 신체활동량의 측정방법으로는, 직접적인 생리량을 측정하는 방법(direct physiological assessment)과 양케이트 등의 조사방식, 그리고 타임스터디 방식과 다양한 기계적·전자적 원리를 이용한 방법(mechanical and electronic monitor)이 있다. 직접적인 생리량 측정방법은 측정 장비 및 측정 공간의 한계로 장시간의 일상생활 측정이 곤란하기 때문에, 근전도MG, 칼로리 카운터, 가속도계 등의 기계적 전자적 원리를 이용한 방법이 이용되고 있다.

그러나, 다양한 산업환경 가운데, 건설 분야는 가장 대표적인 3D업종으로서 인간의 노동력이 가장 많이 소요됨에도 불구하고, 작업노동자의 신체활동량 및 작업부하에 관한 연구는 전무한 실정이다. Mori et al.[5,6]은 생활환경 및 건설현장의 운반 작업에 있어서 역학 환경을 3축 가속도계를 이용하여 측정하였으며, 감성평가를 통하여 작업환경을 평가하였다. 실험용 작업은 각 운반물의 무게와 구배조건에 따른 다양한 작업환경이며, Figure 3과 같이 다양한 가속도계의 장착 위치에 따른 측정 결과를 발표하였다.

가속도계를 통한 역학 환경 평가는, 프랙탈 이론을 이용하여 작업자의 거동의 복잡성을 정량화 하였으며, 가속도의 시간단위 적분량을 이용하여 에너지 소비량을 산출하였으며, 가속도 진폭 및 프랙탈 차원, 그리고 흔들림 값의 비율을 합으로 하여 신체 부담도로 정량화 하였다. 특히 Figure 4와 같이 가속도 센서의 장착 위치와 특정 작업시 신체 움직임과의 상관성이 높은 것으로 나타났다.

## 2.3 작업시 노동부하 및 피로도의 측정

기계화 체계가 확립된 타산업과 달리, 건설현장에서는 작업자의 노동에 관련되는 문제가 많이 남아 있다. 작업효율, 그리고 근로자의 작업환경의 쾌적성 및 안전성에 관련된 구체적인 과제로서는, 장시간 노동, 작업장의 온열 환경, 작업 자세, 각종 소음 및 분진, 그리고 유해화학물질 등에 의한 폭로 등을 들 수 있다. 노동 부하나 피로도는 단일지표로 표현하는 것보다, 복수의 평가지표를 이용하여 종합적인 평가를 실시하는 것이 타당하다.

건설 분야에서는 관련 연구가 거의 없으나, 농업분야, 특히, 기계화가 늦은 각종 산업분야에서는 작업시 노동부하 및 피로도의 평가가 활발히 이루어지고 있다.

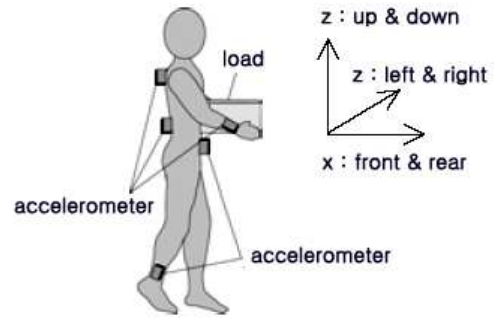


Figure 3. Wearing of accelerometer[6]

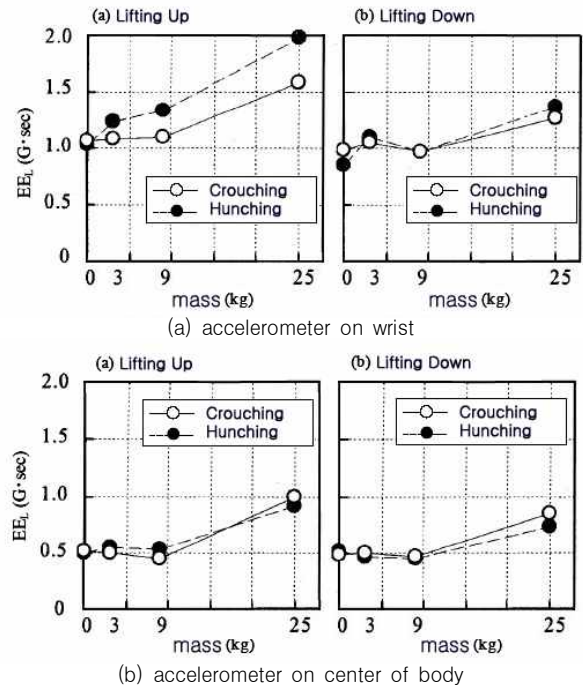


Figure 4. Relation of mass and energy according to location of accelerometer[6]

작업 자세 등 정적인 근육 부담은 심박수나 에너지 대사율 RMR(Resting Metabolic Rate) 등의 동적인 부담의 평가 지표에서는 측정 및 평가가 곤란한 경우가 많기 때문에, 목시에 의한 관찰법, VTR를 활용한 관찰법 등에 의해 자세 및 동작의 조사를 하는 경우가 많다. 그리고, 근전위의 변화로부터 자세 및 동작에 의한 작업시의 근부담을 측정하는 방법도 이루어지고 있다. 작업자 신체 전반의 노동 부담이나 피로 조사는, 생활시간 조사, 타임스터디, 자각적인 피로조사, 심박수의 변화, 에너지 대사율의 측정 등에 의해 이루어지고 있다.

### 3. 건축물의 조립성 및 분해성 평가를 위한 가속도계의 적용 가능성

#### 3.1 실험개요

본 연구에서는 건축재료 및 부품의 조립 및 분해시 소요되는 인력에 의한 에너지량 산출을 위하여 가속도계의 적용성을 검토하였다. 가속도계는 3방향의 가속도 변화를 검출하며, 소형 및 경량으로 장착이 용이하며 일상생활뿐만 아니라 다양한 작업시 지장을 주지 않는다. 특히, 최근에는 운동량 평가 등의 목적으로 스마트기기와 연동되는 기기에 도입이 이루어지고 있으며, 일상동작에 의한 에너지 소비량과의 상관관계 및 재현성이 우수하다는 연구가 다수이다.

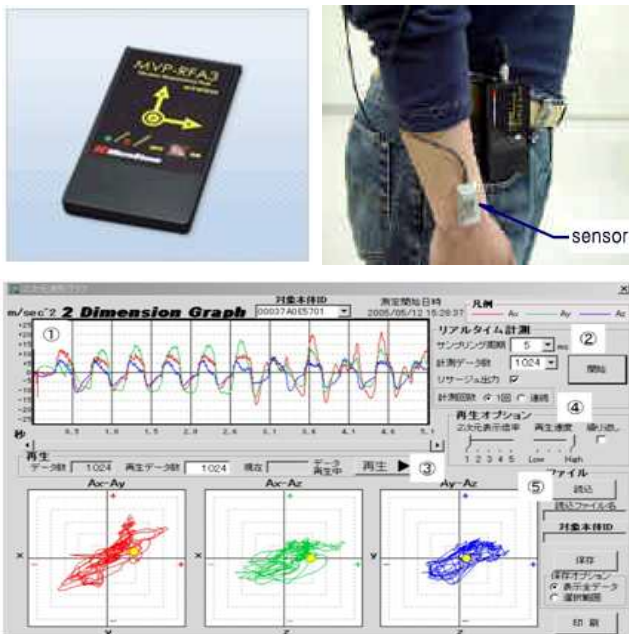


Figure 5. Wearing of accelerometer and measurement

본 실험에서는 대표적인 건식 접합방법인 못과 나사못에 의한 조립 및 분해라는 간단한 시공 동작시 소요되는 에너지량의 정량평가를 수행하였다. 이를 위하여 가속도계를 작업자의 손등에 붙여 가속도를 측정하여 조립과 분해에 소요되는 힘을 산출하였다. 못과 나사못은 동일 직경과 길이를 사용하였으며, 사용 목재는 미송 각재를 이용하였다.

가속도계는 Figure 5의 일본 M사의 무선 모션레코더를 이용하였으며, 0.005초 단위로 3차원의 가속도를 측정하였다. 각 방향의 가속도값은 단위중량당 누적 에너지량(J/kg)으로 산출하여 각 동작시 소요 에너지량으로 간주하였다.

#### 3.2 못과 나사못의 조립·분해 에너지의 정량평가

Figure 6에서 Figure 13은 못과 나사못에 의한 목부재 조립 및 분해시의 가속도 변화와 단위중량당 누적 에너지량을 나타낸 것이다. 본 실험을 통해 조립 및 분해 작업을 부여 받은 작업원의 손에 가속도계를 설치하여, 작업에 소요되는 에너지와 시간, 힘의 방향을 정량적으로 분석하였다.

실험 결과, Figure 7, 9, 11, 13과 같이 동일한 직경과 길이를 가지는 못과 나사의 시공(조립) 및 해체(분해)에 소요되는 단위 에너지는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 그러나, 소요 시간에서는 큰 차이가 나타나 각 작업에 대한 노동자의 단위시간당 소요 에너지는 차이를 나타내게 된다.

또한, 해체에 필요한 응력을 손의 움직임을 통해 측정할 경우, 가속도는 크지 않아도 응력이 충분히 작용하는 상황이 존재하였다. 이는 Figure 12와 같이 못 뽑기가 30초 이전까지 많은 힘이 가해진 상태에서 못이 뽑히지 않아 가속도가 거의 측정되지 않았으나, 이후 못이 뽑히면서 가속도의 증가와 함께 약 40초 지점에서 최대값을 나타내는 것을 알 수 있다. 이 경우, 못을 뽑을 때 실제 소요된 에너지에 비하여 변위가 거의 없기 때문에, 길보기의 가속도가 적게 측정되며 실제 인발 응력을 측정하는 것이 불가능하게 된다. 따라서, Figure 14와 같이 못이 뽑힌 순간의 가속도가 상시 못에 가해진다는 가정을 하여 누적 에너지량을 추정하면, 나사못 분해시 가해진 에너지량에 비하여 중량당 약 30배 이상의 에너지가 소비되는 것으로 나타난다.

여기서, 못이 빠지는 순간과 같은, 재료의 접합이 해제된 상태의 가속도를 일정하게 걸려 있는 응력으로 계산할 경우, 미시적 측면에서의 정확한 소요 에너지량의 산출이 가능할 것으로 생각된다.

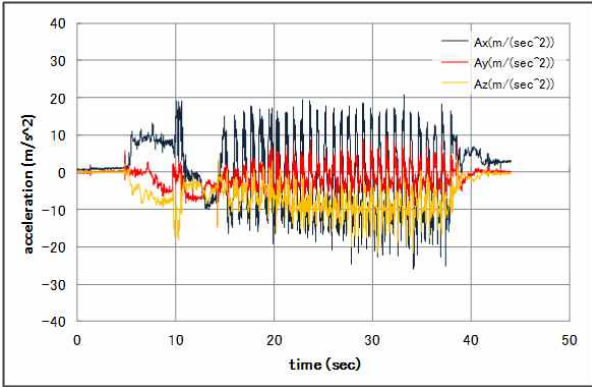


Figure 6. Acceleration(driving screw)

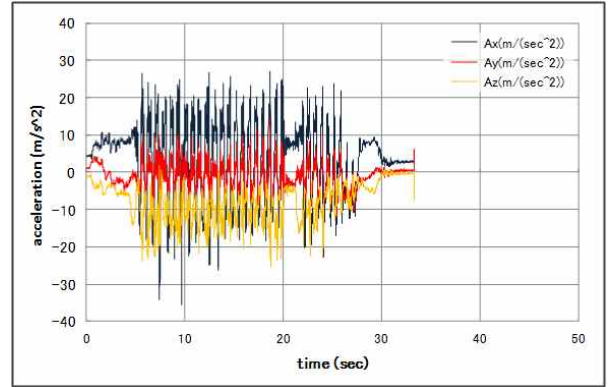


Figure 10. Acceleration(pulling screw)

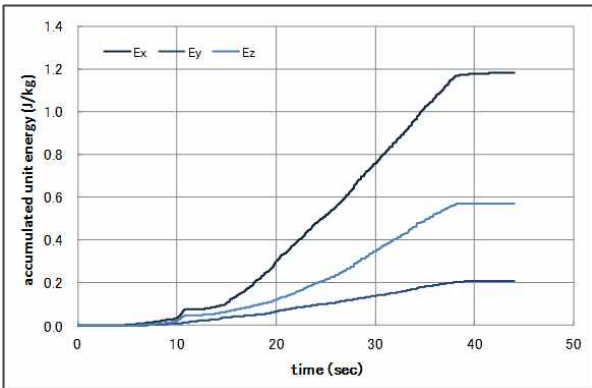


Figure 7. Accumulated unit energy(driving screw)

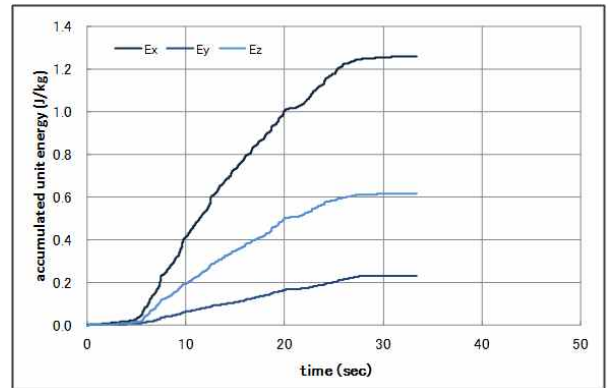


Figure 11. Accumulated unit energy(pulling screw)

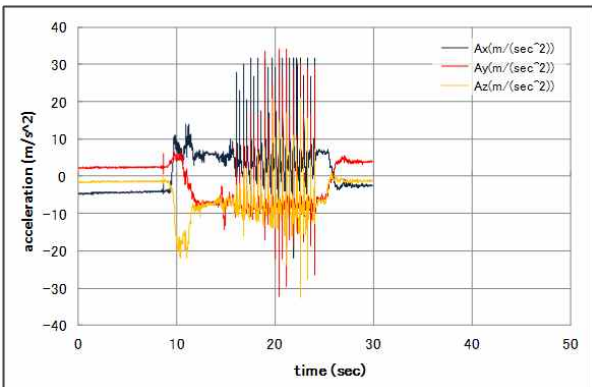


Figure 8. Acceleration(driving nail)

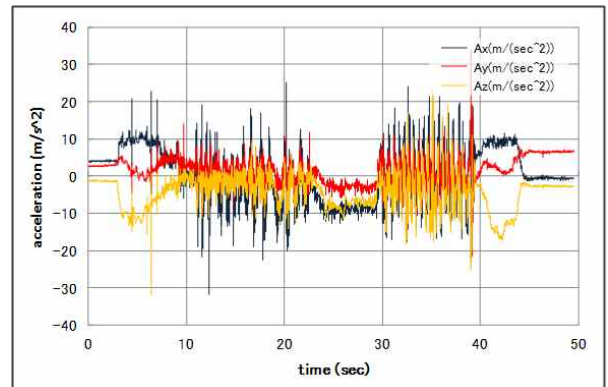


Figure 12. Acceleration(pulling nail)

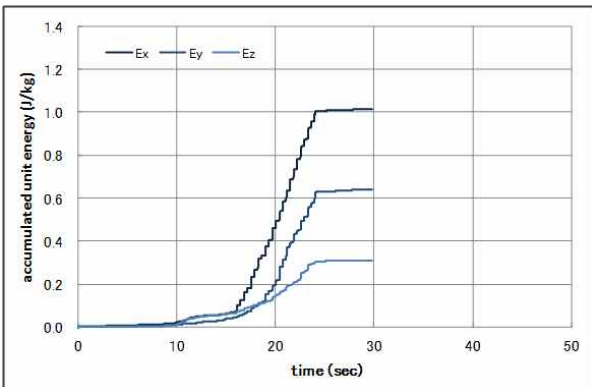


Figure 9. Accumulated unit energy(driving nail)

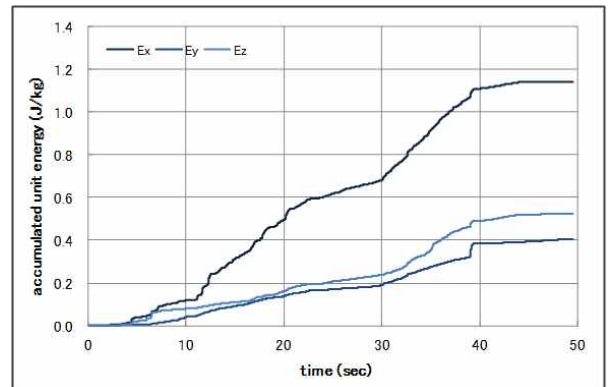


Figure 13. Accumulated unit energy(pulling nail)

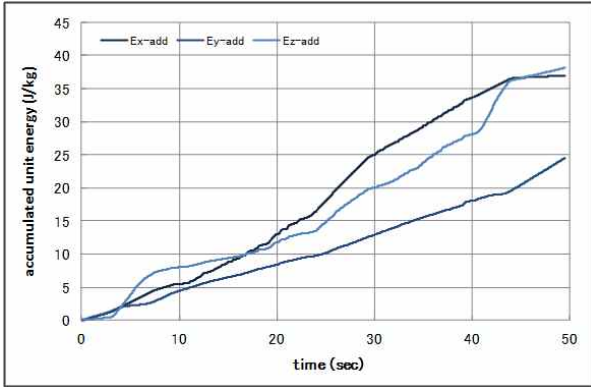


Figure 14. Accumulated unit energy considering frictional force(pulling nail)

향후, 다양한 해체 작업에 있어서, 가속도계에 의한 소비 에너지량을 평가하는 연구가 이루어진다면, 많은 건축재료의 해체의 난이도 및 분해성 설계의 최적성에 대해 정량적으로 평가할 수 있는 것이라고 생각된다. 특히, 동일 부품 및 동일 접합부의 분해에 있어서의 해체목적, 즉 단순철거, 건물 사용 중 유지 및 보수를 위한 기존 부품의 분해, 재료 및 부품의 재이용 및 재사용을 위한 분해, 재료 리사이클을 위한 분해 등 다양한 분해범위와 작업환경에 따른 작업자의 주의와 소요에너지의 차이 등을 정확히 평가할 수 있을 것으로 생각된다.

단, 가속도계나 속도계는 오차가 큰 것과 나사못의 회전 등과 같이 실거리상의 이동이 거의 없는 회전 속도도 거리로서 계산되므로 정확한 거리를 산출할 수 없다. 이는 별도의 동화상 등을 통한 위치 정보와 파라미터 해석을 통해 평가가 가능해질 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

신체 활동량에 대한 정량 평가는 다양한 직업군에 대한 인간 생활의 질적 가치 분석과 운동량 등의 과학적인 평가를 위하여 다양한 분야에서 적극적으로 도입되고 있다.

본 연구에서는 건축 시공행위에서 이루어지는 인간의 노동활동의 역학적 정량 평가를 위하여 현장 측정 및 착용이 용이한 가속도계의 활용 가능성을 고찰하였다.

연구 결과, 못과 나사못의 조립 및 분해에 소요되는 에너지의 정량 평가가 가능하였으며, 불필요한 힘 등의 분석도 가능하였다. 따라서, 가속도계를 이용하여 각종 시공 과정

에서 수반되는 조립 및 분해과정에 관한 다음과 같은 데이터를 수집할 수 있을 것으로 기대된다.

- ① 시공 및 해체작업에 소요되는 단위 시간
- ② 시공 및 해체시 가해지는 노동 에너지량
- ③ 시공 및 해체에 있어서 구성 행위의 역학적 특성

이러한 데이터는 노동량뿐만 아니라 환경부하량의 측정, 나아가 접합부 설계의 타당성 평가에도 활용이 가능하다. 특히, 분해성이 낮은 접합방법은 분별해체가 어려워 혼합 폐기물의 발생 및 인건비 증가의 원인으로 이어지므로, 분해성의 정량평가는 전 라이프사이클에 있어서 환경부하의 정량평가에 유효 활용이 가능할 것으로 판단된다. 또한 기존의 통계기반 데이터베이스와 함께 적용한다면, 다양한 시공행위의 효율성을 거시·미시적 관점에서의 분석이 가능하다.

#### 요 약

최근 건설 분야에서 기계화 공법 등이 활발히 개발되고 있지만, 건설 산업은 전체 산업분야 가운데 여전히 가장 많은 노동력을 필요로 하는 산업분야이다. 특히 재료 리사이클의 활성화를 위해서는 단일 소재화 분리를 위한 수작업에 의한 각종 해체작업 또한 증가하게 된다. 그러나 품셈을 비롯한 관련 통계 기반의 데이터베이스는 실제 인간 에너지의 분석에 한계가 있으며, 해체 작업의 경우는 대부분 정성적인 평가가 주를 이루어 왔다. 본 연구에서는 건설 분야의 인간 노동량의 정량 평가를 위하여 가속도계의 도입을 시도하였다. 이를 위하여 못과 나사못에 의한 조립 및 해체과정을 가속도계를 통하여 에너지량으로 산출하였다.

**키워드** : 조립성, 분해성, 노동에너지, 가속도계

#### Acknowledgement

This work was supported by the Dong-A University research fund.

---

## References

1. Onoda H. A study on design and operation for environment of industrial products [dissertation]. [Tokyo(Japan)]: Waseda University; 2006. 199 p
2. Doi S, Takada M, Yasueda H, Kamo M. The role of fixed infill when installing and changing variable infill: Through the experiments in “Infill Laboratory Glass Cube” located in NEXT21. *Journal of architecture and planning*. 2009 Jan;78(683):11–8
3. Yang S, Matsumoto K, Yashiro T, Nakamura Y, Nishimoto K. Preliminary research on the energy consumption evaluation method of detached house production process. *Journal of architecture and planning*. 2004 Nov;69(585):141–8
4. Matsumoto K, Nishimoto K, Yashiro T, Nakamura Y, Iwahara T, Yang S. Research of potential reduction of embodied energy by reuse of component over multiple generations of detached houses. *Journal of architecture and planning*. 2005 Jul;70(593):25–31
5. Mori A, Asaine W. A proposal on the evaluating method for mechanical environment in daily activities: A case of barrier with wheelchair. *Journal of architecture and planning*. 2005 Nov;70(597):37–44
6. Mori A, Asaine W. Preventing accidents on building construction sites—In case of going up and down the scaffolding steps. *Journal of structural and construction engineering*. 2011 Jul;76(665):1213–9