

6시그마를 이용한 타일 에폭시 접착제의 초기 접착 강도 향상에 관한 연구

이정호* · 배규익* · 하병욱* · 김소민* · 성시일*†

* 경기대학교 산업시스템공학과

A Study on the Improvement of the Initial Adhesive Strength of Tile Epoxy Adhesive Using 6 Sigma Methodology

Jeong Ho Lee* · Gyu Ik Bae* · Byeong Uk Ha* · So Min Kim* · Si Il Sung*†

* Department of Industrial and Systems Engineering, Kyonggi University

ABSTRACT

Purpose: This study aims to optimize the adhesive strength of epoxy adhesive when applied to tiles, addressing frequent issues of adhesion degradation observed in indoor interiors. The degradation often leads to costly repairs and maintenance, highlighting the need for improved adhesive formulations and application techniques.

Methods: Employing the DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, Control) methodology integral to Six Sigma and utilizing MINTAB for data analysis, this research focused on critical factors like curing time, application method, and mixing ratio. The Taguchi Experimental Design within the Design of Experiments (DOE) framework was applied to determine the impact of these parameters on adhesive strength.

Results: The analysis facilitated by Taguchi's method led to notable improvements in adhesive workability and consistency. It identified the optimal combination of factors that significantly increase adhesive strength, evidenced by the improvement in signal-to-noise ratio and I-MR control charts.

Conclusion: By applying a structured statistical approach through Six Sigma and the Taguchi method, the study successfully pinpointed optimal conditions for epoxy adhesive application on tiles. This contributes to quality management in the manufacturing and application processes of epoxy adhesives, ensuring enhanced durability and reliability in indoor tiling applications. The findings offer a significant methodological framework for future material optimization research.

Key Words: Epoxy Adhesive, Adhesive Strength, 6 Sigma Methodology, Taguchi Method

● Received 29 May 2024, 1st revised 3 July 2024, accepted 16 July 2024

† Corresponding Author(sisung@kyonggi.ac.kr)

© 2024, The Korean Society for Quality Management

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-Commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

* 본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 SW중심대학지원사업의 연구결과로 수행되었음(2021-0-01393).

1. 서론

최근, 국내 인테리어 및 리모델링 시장 규모는 2020년 41조 5000억 원을 기록하며 성장하는 추세를 보인다(박용석, 2020). 그러나, 인테리어에 대한 소비자의 요구가 증가함에 따라 시공 하자에 관한 소비자의 불만도 점차 증가하고 있다. 한국소비자원에 따르면, 2018년부터 2021년까지 4년간 ‘인테리어 관련 소비자 피해구제 신청 이유’의 24%가 하자보수 미이행 및 지연이 24%로 가장 많았다(한국소비자원, 2021). 또한, 한국토지주택공사에서 공급한 공동주택 하자 민원 발생 접수 현황에 따르면, 2016년부터 2019년까지 접수된 연평균 9000건의 하자 민원 중 마감 관련 공사가 전체의 54.8%를 차지하였으며, 그중 타일 공사 관련 민원이 28.2%로 가장 높은 비중을 차지하였다(한국주택토지공사, 2020). 이처럼 타일 시공 후 발생하는 문제는 최근까지 계속해서 대두되고 있다.

이를 극복하기 위해 타일 시공에 초점을 맞춘 연구가 나오고 있다. 최근 연구를 살펴보면, 이상규 등(2020)은 타일의 종류(도기질, 자기질, 폴리싱 타일)와 양생조건에서 모르타르 공법(떠붙임모르타르, 시멘트 모르타르, 에폭시수지 첨가)을 통해 에폭시 수지와 모르타르의 화학적 결합 특성을 이용한 부착강도를 측정하여 에폭시 접착제의 부착강도 향상 조건을 연구하였다. 박현정 등(2021)은 타일 공사의 하자 데이터를 바탕으로 ‘들뜸 및 탈락’은 설계 단계에서 구조를 면밀히 검토하고 시공 단계에서 타 공중에 의한 문제를 해결하기 위한 관리가 필요하다고 시사하고 있다. 조용광, 전진호(2021)는 폴리머계 타일접착제의 점붙임 공법을 통해 시공환경 변화에 따른 부착성능 및 변형 저항성을 향상하고자 하였으며, 접착 강도 측정 결과 시멘트계 타일 접착제 대비 폴리머계 타일접착제의 접착 강도가 우수한 것을 확인하였다. 이상윤(2020)은 에폭시 수지 접착제를 사용할 경우 현장시공 시 타일 부착성능에 대한 레이턴스, 즉 경화한 뒤 표면에 형성되는 얇은 막의 영향을 줄일 수 있으며 타일 탈락 시 보수재로서의 활용성 또한 우수한 것이 확인되었다. 선행연구를 살펴보면, 주로 에폭시 접착제와 모르타르 공법 간의 관계에 중점을 두고 접착강도를 강화하는 데에 목적을 두고 있음을 알 수 있다. 이 논문은 기존의 선행연구와는 다른 접근 방식으로, 사용방법의 변경을 통한 직접적인 설계변수의 조정이나 설문조사 등의 정성적 데이터를 기반으로 통계적 기법을 사용한 연구를 진행하였다. 따라서 본 연구는 6시그마 기법과 다구찌 실험계획법을 통하여, 실제 작업 현장에서의 에폭시 접착제 사용에 관한 구체적이고 실용적인 지침을 제공함으로써, 타일 부착과 같은 응용 분야에서 접착제의 성능을 극대화하고, 결과적으로 제품의 신뢰성과 내구성을 향상한다는 점에서 차별점을 가진다.

이 연구의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서는 다구찌 기법 문헌 연구를 수행하여 요약하고 개념과 손실함수를 중심으로 서술한다. 다음으로 3장은 식스시그마의 DMAIC 접근 방식은 정의(Define), 측정(Measure), 분석(Analyze), 개선(Improve), 통제(Control)의 단계로 구성되어 다구찌 실험 계획법을 통해 작업 환경 내의 변동성을 최소화하고 최적의 조건을 식별하고 있다. 마지막으로 4장은 이 연구의 결론으로 구성되어 있다.

2. 이론적 배경 및 선행연구

2.1 에폭시 수지 접착제

에폭시 수지 접착제란, 에폭시기를 함유하는 화합물로, 주로 주체와 경화제를 혼합하여 사용되는 접착제이다. 에폭시 수지 접착제는 우수한 접착력, 기계적 강도, 내화학성, 전기적 특성 덕분에 건설, 항공, 자동차, 전자기기 등 다양한 산업 분야에서 광범위하게 사용되고 있다.

이러한 접착제의 성능은 작업 환경과 방식에 따라 큰 차이를 보이며, 최종 제품의 신뢰성과 내구성에 직접적인 영향을 미친다. 이는 에폭시 수지 접착제의 화학적 접착 원리를 통해 살펴볼 수 있다. 에폭시 수지 접착제는 주제를 단일로 사용하기보다 사용 용도에 따라 특정 경화제를 1:1로 혼합하여 사용한다. 따라서, 주제와 경화제 간의 경화 반응이 접착 원리의 핵심이다.

에폭시 주제는 화학구조 내에서 에폭시기(Epoxyde)가 2개 이상으로 이루어진 접착제이다. 일반적으로 Fig. 1과 같은 화학적 구조를 가진다. Figure 1은 전체적인 에폭시 수지의 화학구조 및 각 구성 성분의 성질을 나타내고 있다. 이는 화학구조의 왼쪽부터 반응성, 내약품성, 강인성, 접착성, 내열성, 유연성을 표현한다. 또한, 친수성인 하이드록실기와 소수성인 탄화수소기와의 규칙적인 분포 때문에 접착성이 매우 커진다(함성민, 2015). 에폭시기의 강한 반응성으로 인해 여러 화합물과 반응하여 다양한 물성의 고분자 물질을 합성하므로 대표적인 열경화성 수지이다.

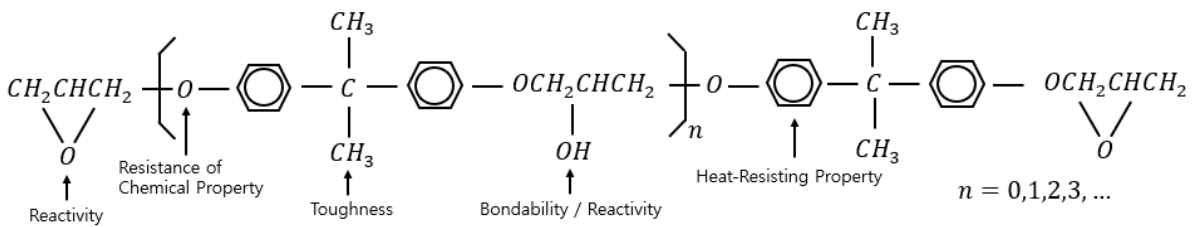

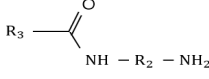
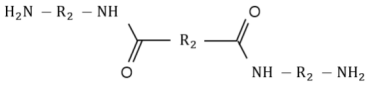

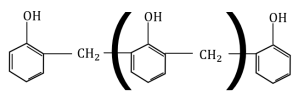
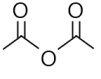
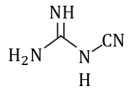
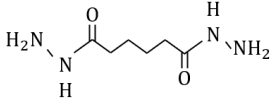


Figure 1. Basic Chemical Structure of Epoxy Resin

에폭시 경화제는 에폭시 수지와와의 경화 반응을 통해 선형구조에서 3차원의 망상 구조로 변하여 접착력을 형성한다. 경화제의 종류에 따라 비율 및 경화 조건 등이 변하며, 이러한 조건에 따라 물성이 달라진다. 에폭시 혼합 공정 대형화의 이유로 접착제를 바르고 즉시 접착하지 못하기 때문에, 대기 시간 동안 습도 및 온도 등 외부 환경에 영향을 받아 접착제의 접착력 저하로 이어지게 된다(유지훈, 2020). Table 1은 경화제의 종류를 나열한 것으로 주제와 경화제의 종류에 따라 비율 및 경화 조건 등이 변하며, 이러한 조건에 따라 물성이 달라진다. 경화제는 에폭시와 만나 경화 반응을 일으켜 단단하고 딱딱한 고체가 되는 특징이 있다. 이때의 경화제는 열가소성 수지와 열경화성 수지로 나뉘어지며, 열가소성 수지는 경화 반응을 통해 열을 내지만, 열경화성 수지는 열을 가해주어 경화 반응을 일으킨다는 특징에서 차이를 가진다(임순호, 1995). 이에 따라 Table 1에서의 상온 경화 특징은 열가소성 수지이며, 고온 경화 특징의 경화제는 열경화성 수지임을 알 수 있다. 본 연구에서 사용되는 에폭시 경화제는 폴리아마이드(Polyamide)로 열가소성 수지이다. 따라서 환경 조건으로 상온 경화가 가능하므로, 온도 요인을 측정하여 실험에 적용하고자 한다.

Table 1. Basic Chemical Structure of Epoxy Resin [8]

분류	반응기 화학구조	비고	
경화제 (Hardener)	Amine (아민)		상온경화기능
	Amidoamine (아미도아민)		상온경화기능
	Polyamide (폴리아마이드)		상온경화기능
	Mercaptan (머캅탄)		상온경화기능
	Polyphenol (폴리페놀)		고온경화
	Anhydride (산무수물)		고온경화
	Dicyandiamide (디시아나디아미드)		고온경화
	Dihydrazide (다하이드라자이드)		고온경화

2.1.2 다구찌 기법의 개념

다구찌 기법의 실험계획법은 불필요한 반복적인 실험을 배제하고, 경제적인 실험 방법을 제공함으로써 제품설계 시 품질, 생산성, 비용 등 설계요소 관점에서 최적화를 유도할 수 있도록 돕는 실험계획법(Design of Experiments) 중 하나이다(Karna et al., 2012). 다구찌 기법에서는 교란 인자의 영향으로부터 품질을 강건하게 유지해야 할 때, 사용되며, 이를 위해서 SN 비(Signal-to-noise ratio)를 사용한다(지용주, 2004). SN 비는 신호 대 잡음의 비율을 의미하며, 잡음에 의한 품질변동으로 발생 되는 손실을 최소화하려는 방법으로 사용한다.

$$SN비 = 10\log \left[\frac{\text{신호의 힘 (power of signal)}}{\text{잡음의 힘 (power of noise)}} \right]$$

다구찌 방법에서는 임의의 제품의 특성치에 대해 직교 배열을 이용한 실험을 할 때, SN 비를 새로운 특성치로 하여 분석하는 것을 제안한다. 여기서 y_i 는 실험에서 얻어진 데이터, \bar{y} 는 데이터들의 평균, σ 는 표준편차를 나타내고 n 은 실험 횟수를 나타낸다. 제품의 손실함수 $L(y)$ 에 의해서 표현되는 손실 값을 임의의 시점에 있어서 품질 특성치

y 값으로 나타내면, 시간이 변함에 따라 y 값은 여러 품질요인에 의하여 변동하므로 제품의 손실 값도 변동하게 된다. 특성치에 따른 손실함수 $L(y)$ 는 3가지로 구분된다. 또한, m 을 y 에 대한 목표치라고 할 때 2차 손실함수에 의한 품질손실은 다음과 같이 주어진다. 이때의 k 는 상수이며, 품질손실계수라 한다.

$$L(y) = k(y-m)^2$$

(1) 망목특성: 특정한 목표치가 주어져 있는 경우

$$\eta = 10\log\left(\frac{\bar{y}}{\sigma}\right), L(y) = \frac{A_0}{\Delta_0^2}(y-m)^2 \quad (1)$$

(2) 망소특성: 목표치가 작을수록 좋은 경우

$$\eta = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=0}^n y_i^2\right), L(y) = ky^2 \quad \left(k = \frac{A_0}{\Delta_0^2}\right) \quad (2)$$

(3) 망대특성: 목표치가 클수록 좋은 경우

$$\eta = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=0}^n \frac{1}{y_i^2}\right), L(y) = k[1/y^2] \quad \left(k = A_0\Delta_0^2\right) \quad (3)$$

망목특성의 경우, 기대손실 L 이 최고가 되려면 μ 가 목표치 m (품질평균)에 근접하는 동시에 σ^2 (품질변동)의 크기도 작아야 한다. 망목특성치의 SN 비를 최대화하는 것은 변동계수의 제곱을 최소화하는 것이며, 이는 y 의 분산을 최소화하는 것이다. 망소특성의 경우, 기대손실 L 을 최소화하기 위한 설계변수의 최적 조건은 가능한 SN 비가 최대가 되도록 설계변수 수준을 선택해야 한다. 망대특성의 경우, 기대손실 L 을 최소화하려면 y 의 평균치는 크게 하고, 분산을 작게 하며, SN 비가 가능한 최대치가 되도록 설계변수의 최적 수준을 결정해야 한다.

본 연구에서는 에폭시 수지 접착제의 초기 접착 강도 향상을 목적으로 두기에 이를 인장강도로 측정하여 종속변수로 두며, 망대특성에 해당하는 SN 비를 본 연구에서 이용하고자 하며, 기대손실 L 을 최소화하기 위하여 y 의 평균치는 크게 하고, 분산을 작게 하며, SN 비가 가능한 최대치가 되도록 설계변수의 최적 수준을 결정하고자 한다.

3. 6시그마

3.1 Define

본 논문의 연구 대상은 타일 및 석재용 에폭시 접착제로 주체와 경화제를 배합한 2액 Type 수성 Epoxy 수지 접착제이다. 주체는 Epoxy Resin 30%, 탄산칼슘 60%, 경화제는 phenol-Skin 7%, DETA 15%, 탄산칼슘 68%로 구성된다. Figure 1에 연구 대상 제품인 주체와 경화제를 나타내었다. Figure 1에 표기된 제품 사용자를 대상으로 SIPOC(Supplier, Input, Process, Output, Customer) 기법인 Table 2를 적용하여 공급자(Suppliers), 입력(Inputs), 공정(Process), 출력(Outputs), 고객(Customers)의 관계를 체계적으로 분석함으로써 프로젝트의 범위를 명확히 한다. VOC(Voice of customer)를 수집한 결과, 실내 타일 인테리어 시공 후 1-2일 내에 타일이 탈락하는 문제가 제기

되었다. 고객의 입장에서 CCR(Critical Customer Requirement)을 분석한 결과, 첫째는 에폭시 접착제의 접착력이 약한 문제인 제품 고유의 문제. 두 번째, 시공자의 제품 사용 역량과 경험이 부족한 경우. 세 번째는 부적합한 환경에서의 제품 사용 방법이다. 이 중 첫 번째 원인인 제품 자체의 품질 향상이 가장 우선적이지만, ISO 9001의 품질 표준을 충족한 점과 품질 향상을 위한 투자 편익 대비 개선 정도가 한계가 있는 점, 공정 관리 수준에서 제품 고유 품질 수준의 향상이 어렵다는 점, 다구찌의 강건 설계의 본 목적을 충족하고자, 두 번째와 세 번째의 지표에 집중하여 측정 가능한 지표인 CTQ(Critical to Quality)로 변환하였다. 그 결과 인장강도(N), 혼합비(%), 가사 시간 및 경화시간(h), 도포 방식(점형/평형/선형)으로 도출되었다. 도포 방식은 현장 작업자의 개인별 작업 방식을 조사하여 나온 결과를 바탕으로 작성하였다. CTQ를 평가하는 최종 지표인 에폭시 접착제를 사용한 타일에 인장력을 가할 때의 떨어지는 힘(N)으로 설정하였다. 이후 예상되는 장애 요인과 제약조건을 검토하며 개선이 필요한 프로젝트의 범위를 명시하여 특별히 집중이 필요한 부분을 파악하여 프로젝트 범위를 명확히 하였다. 이를 통해 개선해야 할 명확한 목표 변수를 설정한 후 실험을 진행하였다.



Figure 2. Picture of epoxy glue

Table 2. Tile Bonding Epoxy Adhesive Process SIPOC

Supplier	Input	Process	Output	Customer
Contractor	Epoxy glue, Tile	Epoxy glue manufacturing	Semi-permanent adhesion of tiles	Contractor, Resident
Start	Mixing of resin and hardener	Use of adhesive	Verification of adhesive tensile strength	Termination

3.2 Measure

3.1.1 측정시스템 분석

Table 3. Adhesion conditions for the currently used epoxy glue

Process condition	Value	Unit
Combination percentage	1:1	%
Pot stability	20	min
Pot life	10(summer)/20(winter)	min
Curing time	24	hour
Apply type	Dot-like structure	-

현 공정능력을 확인하기 전, 측정 시스템 분석을 위해 게이지 R&R(Repeatability and Reproducibility) 분석을 실시하였다. 실험은 Table 3에 기술된 사용 조건을 기반으로 진행되었다. 이 분석 결과, 총 게이지 R&R 기여도는 18.98%로 나타났으며, 이 중 반복성이 18.42%, 재현성이 0.56%를 차지하였다. 반복성은 동일한 측정자, 동일한 측정 장비로 같은 샘플을 여러 번 측정했을 때 발생하는 변동성을 나타내며, 재현성은 서로 다른 측정자가 동일한 샘플을 같은 조건에서 측정했을 때 발생하는 변동성을 나타낸다. 이러한 조치의 결과로 일관성 있는 측정 방식 교정을 통해 작업자 간 변동으로 인한 오류를 예방하는 장점이 있다.

3.1.2 현 공정 상태 분석

표준 사용법을 기반으로 에폭시 접착제의 공정능력을 알아보기 위한 분석을 시행하였다. 실험은 표준 사용법에 따라 실험을 진행하였고, 도포량 및 공정 방식은 숙련된 현장 작업자의 관찰 하에 현 공정 상태 분석 실험을 시행하였다. 공정능력분석을 위해 현장 환경을 모사한 조건을 구현하여 목재 판자에 타일을 접착하여 인장강도를 측정하였고, 20개의 샘플 데이터를 이용하여 공정분석을 진행하였다. 목표 규격 하한 값은 기존 관리 하한 값인 89.6N의 30% 증가를 위한 약 120.0N으로 설정하였다. 현 공정능력에서 평균 인장강도는 155.6N이며, 표준편차는 29.4N을 나타낸다. 공정 능력지수인 Cpk(Capability of Process Katayori) 값은 0.40으로 공정능력이 매우 부족한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 다구찌 실험계획법을 이용하여 표준편차를 최소화하고 공정능력지수 Cpk 값을 증가시키는 방향으로 최적화하며 규격 하한 값을 현 89.6에서 약 30% 정도 증가시키는 것을 목표로 진행하였다.

3.3 Analyze

본 연구는 에폭시 접착제의 접착 강도를 향상하기 위해 프로세스 맵핑, 특성요인도, 및 X-Y MATRIX를 활용하여 접착 강도에 영향을 미치는 결정적 요인들을 식별하고 분석한다. 이 연구는 접착제 도포 방식 및 환경 설계의 복잡성을 효과적으로 해결하기 위한 접근 방식을 채택하며, 접착제의 효율성 및 안정성 개선에 초점을 맞추었다.

Figure 3은 프로세스 맵을 통한 에폭시 접착제의 접착 강도에 영향을 미치는 인자의 분석을 나타낸다. 이 접근법은 복잡한 프로세스를 시각적으로 단순화함으로써, 작업의 각 단계에서 발생할 수 있는 잠재적 문제점들을 초기에

식별할 기회를 제공한다. 작업자, 측정, 도구, 재료, 환경으로 세분화하여 요인들에 대한 체계적 분석을 수행하였다. 이 과정은 접착제의 혼합, 도포, 경화 과정이 접착 인장강도에 미치는 영향을 전반적으로 이해하는 토대를 마련한다.

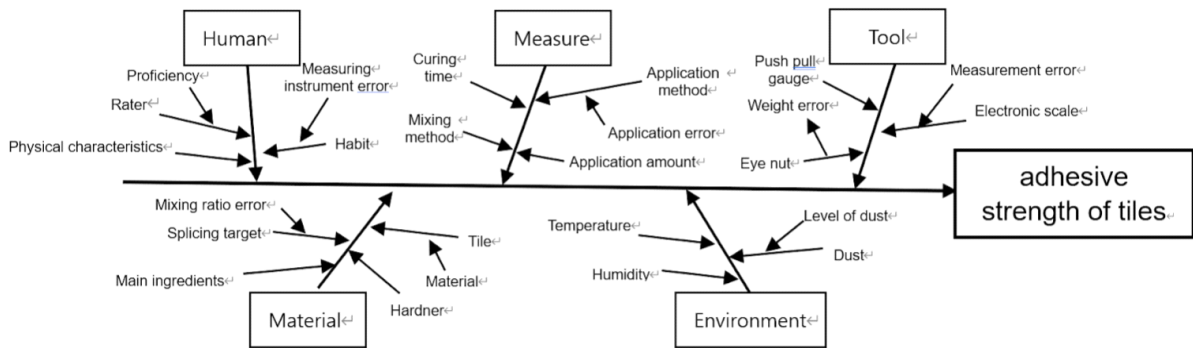


Figure 3. Cause and effect diagram for epoxy adhesive strength of tiles

Table 4는 도출된 인자를 바탕으로 핵심 인자를 정량적으로 평가한 XY 매트릭스 도표이다. X-Y MATRIX를 통해 초기에 식별된 요인 중 접착 강도에 가장 큰 영향을 미치는 핵심 요인들을 정량적으로 평가하였다. 이 과정에서 경화시간, 배합비율 등이 접착 강도에 중대한 영향을 미치는 핵심 요인으로 확인된다. 이를 통해 주요 인자는 전체 퍼센트 순위의 57.9%를 차지하는 혼합 비율, 가사 시간, 도포 방식으로 선정하였다. 해당 요인들의 최적화는 접착제의 성능 개선의 증추적인 역할을 수행한다.

본 연구에서 사용된 분석 도구들은 주로 복잡한 작업 프로세스에서 발생할 수 있는 다양한 문제점들을 체계적으로 식별하고 해결하기 위한 강력한 수단을 제공한다. 프로세스 맵핑은 작업의 전반적인 이해를 돕고, 특성요인도는 문제의 원인을 구조화하여 분석하는 데 유용하다. X-Y MATRIX는 이러한 분석을 바탕으로 핵심 요인들을 정량적으로 평가하고 최적화 방향을 제시한다. 이 과정은 에폭시 접착제의 도포 작업을 최적화하고 접착 강도를 향상하기 위한 중요한 근거 자료이다.

Table 4. X-Y Matrix

X	Y			
	Adhesive tensile strength	Adhesive persistence	RANK	RANK%
	8	7	-	-
Curing time	7	4	84	13.5
Pot stability	8	8	120	19.3
Apply type	7	9	119	19.1
Compounding ratio	9	7	121	19.5
tile material	6	9	111	17.8
Mixing method	4	5	67	10.8

3.4 Improve

3.4.1 다구찌 실험 설계

다구찌 방법은 기술개발, 제품설계 및 공정 관리 등을 최적화하기 위해 사용되는 통계적 실험계획법으로 외부 환경을 고려하여 우수한 기능이 발휘될 수 있도록 설계변수를 최적화할 수 있다. 다구찌 기법을 적용하기 위하여 기준이 되는 특성치를 평가 특성으로 선정하게 되며, 응력, 변위, 무게 등을 고려할 수 있다. 또한, 설계변수의 선정 시, 각 설계변수가 가질 수 있는 값의 범위를 분할 하여 여러 개의 수준(level)으로 정의하게 된다. 설계변수와 수준의 수를 고려하여 적절한 직교 배열을 구성하게 된다(Lee et al., 2007). 연구는 외부 환경에 대하여 최적 접착 조건을 확보하기 위하여 다구찌 기법을 도입하였다.

앞서 도출한 핵심 제어인자는 혼합 비율, 가사 시간, 도포 방식이다. Table 5는 본 연구에서 설정한 제어인자와 각 수준을 나타낸다. 수준은 산포를 통한 인자의 효과를 분석하기 위해 표준 사용방식으로부터 높은 변동을 적용하여 3수준의 결과를 도출해내고자 하였다.

Lettieri(2012)는 에폭시가 접착되는 과정에서 수분은 수소결합에 영향을 주어 접착 물성을 저하한다는 결과가 있다고 하였다. 또한, 유지훈(2020)은 가사 시간과 습도 조건이 접착 강도에 영향을 미칠 수 있다고 하였다. 에폭시 접착제의 사용에 있어서 환경의 변화에도 강건한 설계를 하기 위하여 잡음 인자를 온도, 습도, 분진 유무로 설정하였다. 파라미터 설계 시에 지나치게 허용오차가 작거나 엄격한 공정 조건에서 시험을 진행하는 것은 최적 설계의 목적을 잃어버리기 쉽다. 수준의 결정 기준은 연구의 경제성, 통계적 효율성과 현장 작업자들의 여건을 고려하여 선정하였다. 잡음의 종류인 외란을 고려한 현장에서 극단치인 두 수준으로 나누어 Table 6와 같이 표현하였다.

다구찌 실험계획법은 제어 인자들의 여러 조합에서 성능 특성이 잡음에 어떻게 영향을 받는가를 관찰하여 분석하는 방법론이다. 가장 바람직한 제어인자의 값을 측정하기 위해 내측 배열과 외측 배열을 이용하여 파라미터를 설계한다. 제어인자를 배치하기 위한 내측 직교배열표는 Table 7과 같이 $L_9(3^4)$ 로 배치하였고, 잡음인자를 배치하기 위한 외측직교배열표는 Table 8과 같이 $L_4(2^3)$ 를 선정하여 배치하였다.

Table 5. Control factor and level

Control factor		Level		
		I	II	III
A	Combination percentage	3:7	5:5	7:3
B	Pot life	5	20	35
C	Apply type	spread	Dot-like structure	X-like structure

Table 6. Noise factor

Noise factor	Level	
	I	II
Temperature	10℃	30℃
Humidity	30%	70%
Dust particles	o	x

Table 7. $L_9(3^4)$ orthogonal array

No.	Design factors			
	A	B	C	Error
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Table 8. $L_4(2^3)$ orthogonal array

No.	Design factors		
	Temperature	Humidity	Dust particles
N1	1	1	1
N2	1	2	2
N3	2	1	2
N4	2	2	1

3.4.2 실험 결과 및 최적 조건 선정

본 연구는 접착제의 접착 강도가 품질특성치가 되며 높을수록 좋은 망대특성에 해당된다. 망대특성의 SN 비는 아래의 공식 (4)에 의해서 계산된다.

$$SN = -10\log_{10}\left(\frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}\right)\right) \tag{4}$$

내측/외측 직교배열표의 배열과 각 실험 별 측정 인장강도와 SN 비 계산 결과는 Table 9와 같이 나타난다. 도출한 SN 비를 통하여 Table 10과 같이 제어인자의 수준별 SN 비에 대한 평균값과 기여율을 확인할 수 있다. 이에 따른 신호 대 잡음 비의 주 효과도와 평균에 대한 주 효과도는 Figure 4와 Figure 5와 같이 나타난다.

Table 9. Orthogonal array table and SN ratios for maximizing adhesive strength

No.	A	B	C	e	N1	N2	N3	N4	SN ratio	
					1	1	2	2		Temperature
					1	2	1	2		Humidity
					1	2	2	1		Dust particles
					Tensile strength					
1	1	1	1	1	150.1	177.5	175.0	195.6	44.71998	
2	1	2	2	2	156.3	187.1	148.8	143.9	43.89988	
3	1	3	3	3	185.3	177.2	155.4	133.9	44.02976	
4	2	1	2	3	146.3	131.7	158.5	144.8	43.19044	
5	2	2	3	1	121.9	132.6	122.8	133.2	42.09633	
6	2	3	1	2	118.9	113.6	106.1	119.8	41.15299	
7	3	1	3	2	177.2	151.6	140.7	160.5	43.85387	
8	3	2	1	3	142.8	90.1	114.6	164.0	41.46385	
9	3	3	2	1	140.2	111.1	127.2	105.8	41.50223	

Table 10. Contribution rate of control factors

Factors	Level	Square Sum	Level average	Contribution rate
A	1	132.6496	44.2165	1.3377
	2	126.4398	42.1466	-0.7322
	3	126.8200	42.2733	-0.6055
B	1	131.7643	43.9214	1.0426
	2	127.4601	42.4867	-0.3921
	3	126.6850	42.2283	-0.6505
C	1	127.3368	42.4456	-0.4332
	2	128.5926	42.8642	-0.0146
	3	129.9800	43.3267	0.4478
error	1	128.3185	42.7729	-0.1060
	2	128.9067	42.9689	0.0901
	3	128.6840	42.8947	0.0159

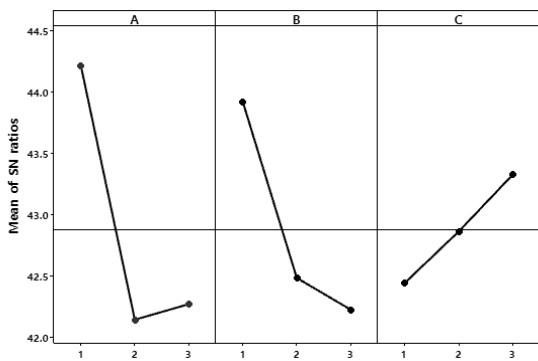


Figure 4. Plot of main effects for SN ratios

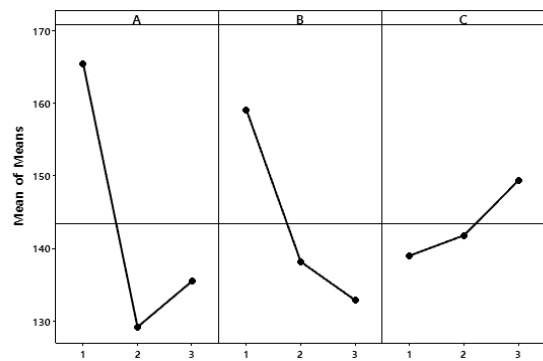


Figure 5. Plot of main effects for Means

Table 11. Analysis of variance of SN ratio (ANOVA Table)

Factors	SS	DOF	MS	F0	P
A	8.0769	2	4.0385	137.37	0.007
B	4.9919	2	2.4959	84.90	0.012
C	1.1653	2	0.5827	19.82	0.048
e	0.0588	2	0.0294		
Total	14.293	8			

통계분석 프로그램인 MINITAB을 사용하여 SN 비의 분산분석을 수행한 결과는 Table 11에 나타내었다. 분산분석 결과 주제-경화제 혼합비율(A)과 가사시간(B), 도포방식(C) 모두 p-value(0.05)에 유의함을 보인다. 변동량을 고려하였을 때, 주제-경화제 혼합비율(A)이 총변동량의 56.5%를 차지하며 접착 강도에 가장 큰 영향을 미친다. 그다음 B, C 순으로 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

SN 비에 유의한 영향을 주는 제어인자의 최적 수준은 SN 비를 최대로 하는 수준이다(S.H.Park, 1995). Table 9와 Table 10으로부터 타일 에폭시 접착제에 대하여 최적 접착 조건은 주제-경화제 혼합을 3:7(A1), 가사 시간 5분 (B1), 도포방식 X자 선형(C3)이고, 해당 최적 조건의 SN비에 대한 예측값은 아래의 식(5)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \widehat{SN} &= \hat{\mu} + \hat{a}_1 + \hat{b}_1 + \hat{c}_3 \\ &= 42.8788 + 1.3377 + 1.0426 + 0.4478 \\ &= 45.7069 \end{aligned} \tag{5}$$

3.4.2 실험 조건 검증

최적 접착 조건을 검증하기 위해 measure 단계의 현 공정 상태 분석과 동일한 시험 방식으로 20개의 샘플을 통하여 평가를 진행하였다. MINITAB을 이용한 개선 전 공정능력분석은 Figure 6과 같고, 개선 후 공정능력분석은 Figure 7과 같이 나타난다. 평가 척도는 평균(M), 표준편차(SD), 관리하한(LCL), 공정능력지수(Cpk), 시그마 수준(ZST)이며, Figure 6과 Figure 7을 통하여 분석한 개선 전과 개선 후의 평가 결과는 Table 12와 같다. 최적 수준 조합의 접착력 해석 결과 평균 접착력은 155.6N에서 175.57N으로 12.83% 증가하였고 표준편차는 39.5% 감소를 나타내었다. 관리 하한의 경우, 목표값으로 설정한 120N에 도달하였으며 기존 관리 하한값인 89.6N에서 121.6N으로 35% 증가하였다. 최종적으로 공정능력지수(Cpk)는 0.40에서 1.04로 0.604가 증가함에 따라 시그마 수준이 2.70 σ 에서 4.62 σ 로 1.92 σ 가 증가함을 보였다. 이는 접착력 평균이 증가함과 동시에 군내 변동이 감소하며 공정능력이 현저히 개선되었다는 것을 의미한다.

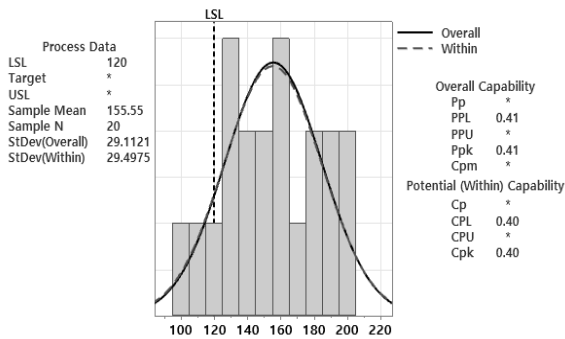


Figure 6. Process capability of Improvement before

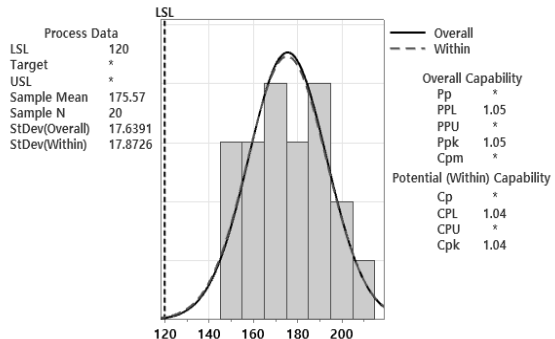


Figure 7. Process capability of Improvement after

Table 12. Result of Process capability analysis

Improve ment	Test Sec			Test Result				
	Combination percentage	Pot life	Apply type	$M(N)$	SD	$LCL(N)$	Cpk	$ZST(\sigma)$
Before	5:5	20	Dot-like structure	155.55	29.50	89.60	0.40	2.70 σ
After	3:7	5	X-like structure	175.57	17.87	121.60	1.04	4.62 σ

3.5 Control

Measure 단계에서 수행한 개선 전 공정능력분석과 Improve 단계에서 수행한 개선 후 공정능력분석을 관리도로 나타내었다. 개선 전 I-MR관리도는 Figure 8, 개선 후 I-MR관리도는 Figure 9와 같다. 개선 전과 개선 후의 I-MR 관리도를 비교하면 개별값의 관리하한(LCL)이 증가하였으며 관리상한(UCL)과의 범위가 좁혀지고, 이동범위 또한 18.2% 정도 축소되었다. 이는 통계적으로 공정이 관리되고 있고, 기존의 공정능력에 비해 개선되었음을 의미한다.

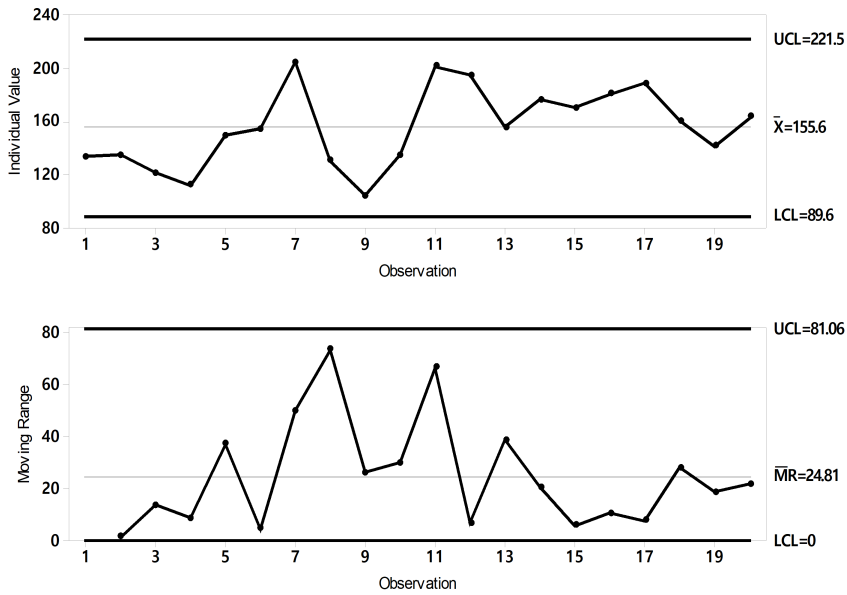


Figure 8. I-MR Chart of Improvement before

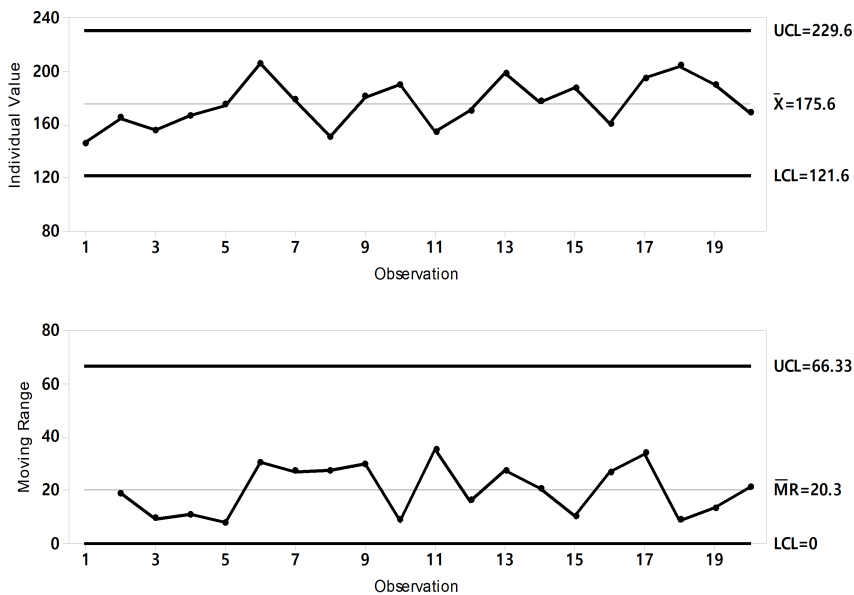


Figure 9. I-MR Chart of Improvement after

조건 최적화를 통해서 공정 상태는 통계적으로 관리되고 있으며, Cpk 값이 1.04로 공정능력이 보통(General) 수준으로 관리되고 있음을 확인할 수 있다. 이는 기술상의 문제로 공정 개선의 대상이 되며, 개선을 통해 공정의 산포를 줄이며 관리 한계의 범위를 좁혀야 함을 제시한다. 이를 위해 에폭시 접착제의 접착력을 개선하고 지속해서 유지하기 위해 작성된 관리계획서는 Table 13과 같다.

Table 13. Control plan for Adhesive Strength of Tile Epoxy Adhesive

Process :		Improvement of the Initial Adhesive Strength of Tile Epoxy Adhesive					
No.	Target	Specification	Unit of measure	Frequency	Record	Action criterion	Reaction Plan
1	Adhesive Strength	In control	N	Before construction	Indirect measure % Record	When the adhesive strength is measured to be lower than LCL	Cause analysis
2	Combination percentage	3:7	%	Before mix adhesive		When the ratio changes due to residual amount or operator error during mixing work	Continue or rework to management level considering the level of change
3	Apply type	X-like structure	-	After mix adhesive		In case of fluctuations due to measurement errors or operator errors	
4	Pot life	5	min	After mix adhesive			

4. 결 론

본 연구는 다양한 환경에서 사용되는 에폭시 접착체의 최적 조건을 6시그마의 다구찌의 강건설계를 기반한 미니탭 분석을 통해 기존의 사용 조건보다 향상된 사용 방법의 조건을 도출한다. VOC 수집을 통해 기존의 방식은 온도와 습도 등 다양한 잡음 인자를 고려하지 못한 설계에 통제 가능 범위가 벗어난 결과로 타일 탈락 및 빈번한 접착

불량을 확인할 수 있다. 따라서 본 실험의 최적 조건인 주제와 경화제 혼합비(3:7)과 5(분)의 가사시간, X-형 도포 방식을 통해 확인 실험한 결과, 잡음인자의 변동에 대하여도 기존 사용 방법보다 15%의 접착력 향상과 2.7σ 수준의 향상을 이룰 수 있었다.

또한, 이를 통해 기존의 접착력의 주요 연구 대상이던 에폭시 수지 접착제 물적 특성과 관련된 제품 개발을 통한 정량적 방법의 해결책에서 비교적 손쉽게 접근 가능한 정량적 방법으로의 접근으로 기존 대비 낮은 비용의 접근성으로 접착력 향상을 기대해 볼 수 있는 시사점을 가진다.

향후 현장 상황을 높은 수준으로 반영한 잡음 수준으로 설계된 실험 조건으로 확장된 연구를 통해 공정 산포를 줄이는 방안을 모색할 계획이다. 공정 산포를 줄이는 6시그마의 DMAIC 방법론을 통하여 추가적으로 탐색한 인자와 수준으로 접착강도 최적화를 수행할 예정이다. 또한, 타일에 한정된 에폭시 접착제 기반한 연구를 넘어 더욱 범용적으로 사용되는 다양한 용도에서의 접착제를 개선하는 데 도움이 될 것으로 기대한다.

REFERENCES

- Chi, L. Z., Kwak J. S., & Ha M. K. 2004. Geometric Error Analysis of Surface Grinding by Design of Experiments Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers 13(4):1-8.
- Cho, Y. K., Jeon, J. H., Park, C. H., & Jo, S. H. 2021. Preparation and Construction Method of Polymer Tile Adhesive for Reducing Tile Defects. Proceedings of the Korea Institute of Building Construction Conference 21(1): 183-184.
- Ham, S. M., & Kim, W. K. 2014. Long-term Strength Properties of Hardener-Free Epoxy-Modified Mortars. Journal of the Korea Institute of Building Construction 34(2):613-614.
- Im, S. H. 1995. High Performance Thermoplastic Composites. Polymer Science and Technology 6(5):451-458.
- Jeon, Y. G., Huh, H. J., Lee, S. B., Park, H. H., & An, B. G. 2020. A Study on the Quality Improvement of Mechanical Drawing Notes Using Lean 6 Sigma Analysis. Journal of the Korean Society for Quality Management 48(3): 381-393.
- Jin, Y. Y., & Jung, S. P. 2008. Structural Robust Design of PEMFC Gasket Using Taguchi Method, Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences 36(8):740-746.
- Karna, S. K., Singh, R. V., & Sahai, R. 2012. Application of Taguchi Method in Process Optimization, Proceedings of the National Conference on Trends and Advances in Mechanical Engineering, YMCA University of Science & Technology, Faridabad, Haryana.
- Kim, T. G., Song, B. Y., & Lee, H. S. 2019. The Robust Design for Urban Railway Vehicle Suspension System Using Taguchi Method. Journal of The Korean Society For Urban Railway 7(1):95-105.
- Kim, J. G. et al. 2016. Development of Epoxy Adhesive using Core Shell Structured Latent Curing Agent. Korea Institute of Industrial Technology, 1-83.
- Kim, K. H., & Kim, H. J. 2024. A Study on the Build of a QbD Six Sigma System to Promote Quality Improvement (QbD) Based on Drug Design, Journal of the Korean Society for Quality Management 50(3):373-386.
- Kwon Y. S., & Jeong Y. D. 2006. Optimization of Injection Molding Process using Experiment of Design, Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers Conference.
- Lee, B. Y., Lee, H. W. 2007. Shape optimal design of an automotive pedal arm using the Taguchi method, Journal of the Korean Society for Precision Engineering 24(3):76-83.

- Lee, H. I., Son, T. H., Hong, L., & Park, C. H. 2022. Construction Trends Briefing” Proceedings of the Korea Institute of Construction & Economy Research 839(1):3-12.
- Lee, S. K., Kim, G. Y., Hwang, E. C., Son, M. J., Lee, S. Y., & Nam, J. S. 2020. Adhesion Properties of Epoxy Resin Adhesive Reinforced Tile, Proceedings of the Korea Institute of Building Construction Conference 20(1): 128-129.
- Lettieri, M., & Frigione, M. 2012. Construction and Building Materials 30:753-760.
- Park, H. J., Eom, Y. B., Jung, W. J., & Kim, D. Y. (2021). A Study on the Analysis of Defect Types and Reduction Measures in Tile Work of Apartment Houses. Journal of the Korea Institute of Building Construction 21(6):701-712.
- Park, S. H. 1995. Design of Experiment. Minyoungsa, pp. 521-524.
- Park, S. H. 2022. Modern Experimental Design Methods. Minyoungsa.
- Prolongo, S. G., del Rosario, G., & Ureña, A. 2006. Comparative study on the adhesive properties of different epoxy resins. International Journal of Adhesion and Adhesives 26(3):125-132.
- Woon G. J. 2013. Optimal Design of the Front Upright of Formula Race Car Using Taguchi's Orthogonal Array, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers 22(1):112-118.
- Yoo, C. B., Jeong, S. I, Lee, M. J., Jeon, Y. H., Kim, T. K., Na, M. H., Sung, S. I., & Kim, S. J. 2021. Recent Statistical Quality Control Based on ISO.KS, Minyoungsa.
- Yoo, J. H., Shin, P. S., Kim, J. H., Lee, S. I., & Park, J. M. 2020. Evaluation of Adhesion Property with Pot Life and Curing Humidity of GFRC and Epoxy Adhesive, Journal of the Korean Adhesion and Interface Society 21(2):65-70.
- Yu, I. G., Ahn, S. J., Ryu, S. M., Hong, S. H., & Lee, M. K. 2024. Optimization of a Rubber based Colloidal Suspension Manufacturing Process Using Mixture Experimental Design, Journal of the Korean Society for Quality Management 52(2):377-394.

저자소개

- 이정호** 경기대학교 산업경영공학과를 재학중이다. 주요 관심분야는 6시그마, 생산관리, 실험계획법, 생산통제 등이다.
- 배규익** 현재 경기대학교 산업경영공학과를 재학중이다. 주요 관심분야는 물류최적화, SCM 등이다.
- 하병욱** 경기대학교 산업경영공학과를 재학중이다. 주요 관심 분야는 공급망관리와 스마트팩토리 분야이다.
- 김소민** 경기대학교 산업경영공학과와 국제학과를 복수 재학중이다. 주요 관심분야는 생산관리, 국제학 등이다.
- 성시일** 고려대학교 산업시스템정보공학과에서 졸업하여 동 대학원에서 석사학위를 받았으며, KAIST 산업 및 시스템 공학과 박사 학위를 받았다. 이후 삼성전자와 국방기술품질원에서 재직한 후, 인제대학교 산업공학과 교수를 마치고 현재는 경기대학교 산업시스템 공학과에 부교수로 재직 중이다. 주 연구 분야는 국방품질경영과 가속수 명시험계획법 그리고 RAM-C 분석 등이다.