

농촌주택 및 목조주택 표준모델 구조체의 습·열 환경 성능 개선 방안

Hygrothermal Performance Improvement Plan of Standard Model for Rural Housing and Wooden Housing

유 동 완*
Yoo, Dong-Wan

이 태 구**
Lee, Tae-Goo

Abstract

The purpose of this study was to investigate whether the standard models for rural housing and wooden housing model have performance for hygrothermal and to propose a way of improvement relevant to hygrothermal performance for those models. All of the models to be analyzed were found to have some parts that were absent of stability in terms of performance for hygrothermal. In the process of analyzing the causes and proposing improvement measures, the following conclusions were derived. First, The exterior surface of the structure should be composed of a structure with good moisture permeability, and for the interior surface, a variable vapor retarder paper should be applied in consideration of the reverse condensation phenomenon in summer. Second, in terms of performance for hygrothermal, applications of external insulation plaster finish to the exterior wall or of ventilation method using a rafter vent on the roof should be avoided. Third, a rain screen method with a ventilation layer should be applied to the exterior wall, and a method of constructing ventilation layer separated from the insulation layer with a vapor retarder paper should be applied to the roof. Fourth, the application of insulation materials having capillary action, such as wood fiber insulation board or cellulose insulation board, contributes to more stable performance for hygrothermal.

주요어 : 습·열 환경 성능, 농촌주택 표준모델, 목조주택 표준모델

Keywords : Hygrothermal Performance, Rural House Standard Model, Wooden House Standard Model

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

한국농촌경제연구원(KREI)에 따르면 COVID-19로 인한 사회적·경제적 혼란이 이어지고 수도권과 광역시를 중심으로 주택가격이 급등하는 가운데 농촌 생활에 대한 사람들의 관심과 선호가 증가하고 있으며, 작년 기준 귀농 가구원은 1만 7447명으로 전년보다 1,266명(7.8%), 귀촌 가구원은 47만 7122명으로 전년보다 3만 2658명(7.3%) 증가한 것으로 나타났다. 2020년 귀농·귀촌 실태조사 결과 보고서에 따르면 귀농·귀촌 후 처음 거주한 주택의 종류는 귀농 가구의 85.8%, 귀촌 가구의 49.7%가 단독주택으로 가장 많았으며, 거주 주택의 점유 형태는 귀농 가구의 70.3%, 귀촌 가구의 56.6%가 신축이나 구입을 통한 자가인 것으로 나타났다. 이에 정부에서는 신축을 원하는 귀농·귀촌 가구를 위해 농촌주택 표준설계도를 개발하여 보급하고 있으며, 최근 기존 농촌주택 표준모델들을 현행 건축물 에너지 성능기준에 부합하도록 설계도를 수정하여 배포하였다. 그러나 농촌주택의 에너지다소비형산업 성능이 높아지고, 기밀해질수록

결로 및 곰팡이와 같은 습·열 환경 성능 측면에서의 하자 발생 위험성은 더욱 높아짐에도 불구하고 구조체의 습·열 환경 성능에 대한 고려는 전혀 이루어지고 있지 않는 것이 현실이다. 특히 26가지의 농촌주택 표준모델 중 15가지가 습기에 취약한 목조 주택으로 건물의 구조적 안정성 및 실내 쾌적성 확보를 위해서는 반드시 표준 설계도에 습·열 환경 성능을 고려한 구조체 구성이 반영될 필요가 있다.

이에 본 논문에서는 정부에서 제시하고 있는 농촌주택 표준 설계도¹⁾와 목조주택 표준설계도²⁾의 구조체 모델을 대상으로 습·열 환경 성능을 검토하고, 습·열 환경 성능을 확보하기 위한 개선 방안을 제시하고자 한다. 본 연구 결과가 습·열 환경 성능을 고려한 목구조 농촌주택 설계 시 기초자료로 활용되기 위한 연구의 목적으로 한다.

1.2 연구의 방법 및 범위

분석 대상은 농촌주택 표준설계도와 목조주택 표준설계도에서 제시하고 있는 목조주택 외벽과 지붕 모델 중 중부 1지역의 구조체 열관류율 기준인 0.15W/m²K 이하를 만족하는 구조체를 분석 대상으로 선정하였다. 바닥 구조체는 대부분 철근콘크리트 구조로 이루어지고 있으며, 완전 불투습 구조를 가지기 때문

* 세명대학교 건설공학과 대학원, 공학박사과정

** 세명대학교 건축공학과 교수, 공학박사

(Corresponding author : Department of Architectural Engineering, Semyung University, tglee2911@naver.com)

이 연구는 2021년도 국토교통부 도시건축연구사업 연구비 지원에 의한 결과의 일부임. 과제번호:21AUDP-B146511-04

1) 농림축산식품부·농어촌공사, 농촌주택 표준설계도 종합안내서, 2019, pp. 1-48.

2) 산림청, 목조주택표준설계도 리플렛, 2019, pp. 1-2.

에 분석 대상에서 제외하였다. 외벽과 지붕에 대한 습·열 환경 성능 분석은 전용 시뮬레이션 프로그램인 WUFI Pro 6.5와 WUFI Bio를 활용하고자 하며, 기존 분석 모델과 개선안을 대상으로 다년간의 수분 안정성, 목질 재료의 구조적 안정성, 결로 및 곰팡이 발생 위험성을 평가 항목으로 하여 안정성 확보 여부 검증 및 주요 문제 발생 원인에 대한 분석을 진행하고자 한다.

2. 습·열 환경 성능 분석 조건 설정

2.1 선행연구 고찰

장성진 외 4명(2016)³⁾은 WUFI 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 2010년, 2014년도 농촌주택 표준모델의 외벽에 대한 습·열 환경 성능을 분석하였다. 이정훈(2017)⁴⁾은 국내의 실내·외 기후 데이터를 기반으로 WUFI 시뮬레이션을 활용하여 경량목구조 벽체의 재료의 변화, 벽체의 형태 구성 변화 등에 따른 습·열 환경 성능을 분석하였다. 권혜주 외 1명(2019)⁵⁾은 국내 에너지 절약 설계 기준에서 제시하고 있는 성능을 해외 기준과 비교하고, WUFI를 기반으로 한 습·열 환경 성능 시뮬레이션을 통해 현재 기준에 대한 문제점 분석 및 기준 개선안을 제시하였다. 김동준 외 3명(2020)⁶⁾은 근대 건축물의 주요 부위인 외벽을 대상으로 WUFI 시뮬레이션을 활용한 습·열 환경 성능 분석을 통해 적절한 리모델링 설계기법을 제안하였다.

국내 관련 선행 연구들을 고찰한 결과 건축물의 에너지 성능이 높아짐에 따라 습·열 환경 성능 확보의 필요성을 강조하고 있으며, 분석 및 검증 방법으로 DIN 4108 기반의 WUFI 시뮬레이션을 활용하고 있는 것으로 나타났다. 특히 상대적으로 습기에 취약한 목조 주택에서의 습·열 환경 성능 분석 및 개선 방안에 대한 연구들이 주로 이루어지고 있으며, 대부분 외벽 구조체만을 분석 대상으로 하고 있는 것으로 나타났다.

2.2 분석도구

DIN 4108⁶⁾ 규정을 기반으로 하는 WUFI는 독일 Fraunhofer IBP에서 개발되었으며, Wärme Und Feuchte Instationär의 약자로 열과 습기의 비정상 상태를 뜻한다. 자연적인 기상 환경에 노출된 건축 부재의 습·열 환경 성능을 동적 계산하는 프로그램으로 건축 부재의 열·습기 비정상 상태를 동적 계산하기 위하여 수증기 확산과 모세관 전달이 고려된 최신 알고리즘과 실측된 건축 재료의 물성 값을 사용하며, 실외에 실제 건축 부재를 구성하고 모니터링 한 실측값과 프로그램의 계산 결과값을 비교함으로써 프로그램 결과값에 대한 신뢰도를 검증하였다.

이에 본 논문에서는 경량목구조 주택의 습·열 환경 성능을

분석하기 위한 도구로 WUFI Pro 6.5와 WUFI Bio 프로그램을 활용하였다.

2.3 기본 계산 조건 설정

외벽의 경사도는 일반적으로 지면과 직각을 이루기 때문에 90°를 기본 계산 조건으로 설정하였으며, 지붕의 경사도는 실제로 다양하게 계획되고 있지만 분석 모델 간의 객관적인 성능 비교 분석을 위해서는 공통적인 경사도를 적용할 필요가 있을 것으로 판단하여 지붕의 경사 각도는 30°를 기본 계산 조건으로 설정하였다. 방위는 8방향으로 구분하고 있으며, 이 중 일사 획득량이 가장 적고, 이로 인해 구조체의 건조 속도가 가장 느린 북향을 기본 계산 조건으로 설정하였다. 지면 단파 반사율 (Ground Short -Wave Reflectivity)은 기본 값을 적용하였으며, 정밀 복사 밸런스(Explicit Radiation Balance)는 지분만 활성화하는 것을 기본 계산 조건으로 설정하였다.

실외 기상조건은 2000년도부터 2019년까지 총 20년간의 실측된 국내 기상청 데이터를 기반으로 국제 표준 ISO 15927-4:2005의 기상 데이터 알고리즘을 적용하여 구축한 국내 22개 기상 데이터 중 강수량 및 상대습도가 가장 높은 목포지역을 기본 설정 조건으로 하였다. 실내 기상 데이터는 온·습도 실측 데이터를 기반으로 구축된 EN 15026 기준을 활용하고자 하며, 계산 기간은 2021년 10월 01일부터 2027년 10월 01일까지 총 6년을 기본 계산 조건으로 설정하였다 <Table 1>.

모델링 시 적용한 건축 자재의 물성 값은 실측 데이터를 기반으로 한 WUFI 재료 데이터베이스를 활용하였으며, 밀도, 공극률, 비열, 열전도율, 증기 확산저항 등의 기본 물성 값에 대해서는 건축물 에너지 절약 설계 기준 해설서⁷⁾상에서 제시하고 있는 건축 재료 별 KS 기준⁸⁾ 및 국내 건축 재료의 시험 성적서의 데이터를 우선 적용하여 현재 국내 건축 자재의 물성 값을 최대한 반영하였다.

Table 1. Set the WUFI simulation default calculation conditions

구분		분석 조건 설정	
외피	경사도	외벽	90°
		지붕	30°
	방위		북향
	지면 단파 반사율		일반값
	정밀복사 밸런스	외벽	비활성화
		지붕	활성화
	초기 조건	상대습도	80%
온도		20°C	
기상	실외 기상	서산	
	실내 기상	EN 150262 + 습기 부하-높음	
계산 조건	계산 기간	6년	
	계산 모드	열과 습기 전달 계산	

7) 국토교통부, 건축물의 에너지절약설계기준 해설서, 국토교통부고시 제 2017-881호, 2017.12.28. 일부개정, 시행 2018. 09. 01, pp.141-147.

8) KS M 3808, KS M 3809, KS L 9102, KS M ISO 4898, KS F 5660에 의한 단열재의 열전도율.

3) 장성진 외 4명, 국내 농어촌 표준 목조주택의 Hygrothermal 성능 분석, 목재공학, 44(3), 2016, p.447.

4) 이정훈, 경량목구조 패시브하우스 외피의 Hygrothermal 거동, 숭실대학교 박사학위논문, 2017, pp.139-141.

5) 권혜주, 최정만, 습열 거동 분석을 통한 국내 에너지절약설계기준의 범용성에 관한 문제점 분석, 한국생활환경학회지, 26(1), 2019, p.8.

6) DIN 4108 Thermal Protection and Energy Economy in Building, 1969.

2.4 성능 평가 기준

성능 평가 항목은 다년간 수분 안정성, 목질 재료의 구조적 안정성, 결로 및 곰팡이 발생 위험에 대한 안정성 평가를 진행하고자 한다. 다년간 수분 안정성 평가는 구조체의 총 합습량이 매년 일정한 패턴으로 평형을 이루는 시점을 확인하고자 하며, 경량목구조의 경우 3년 내에 총 합습량이 평형을 이루지 못하면 하자 발생 위험성이 있는 것으로 판단한다.⁹⁾ 목질 재료의 구조적 안정성 평가는 목질 재료의 합습량을 기준으로 하며, 순수 목재는 부피 밀도 대비 최대 합습량 20 M.-% 이상, 합성 목재는 18 M.-% 이상일 경우 목질 재료의 부식이 발생하여 구조적 안정성을 확보하지 못하는 것으로 판단한다.¹⁰⁾ 본 연구의 분석 모델의 경우 OSB가 판정 대상이 되며, 합성 목재에 대한 기준을 따른다. 결로 발생 위험 평가는 부피 밀도 대비 최대 합습량이 100 M.-%를 초과하는 경우 결로가 발생하는 것으로 판단하며, 분석 대상 부위는 단열재의 실내외 측 표면을 대상으로 진행하고자 한다. 곰팡이 발아 위험 평가는 0~6까지의 숫자로 정량화된 곰팡이 지수(Mould Index)를 활용하고자 하며, 0.5 이하를 만족할 경우 곰팡이 발생 위험에 대한 안정성을 확보하였다고 판단한다.¹¹⁾ 분석 대상 부위는 단열재의 실내외 측 표면과 실내 마감 면으로 하였다.

3. 분석 대상 선정

3.1 농촌주택 표준모델

농림축산식품부와 한국농어촌공사는 농어촌의 자연경관과 조화를 이루면서 변화된 주거생활을 반영한 ‘농촌주택 표준설계도’를 개발하였으며, 농어민 및 도시민에게 표준 주택 도면을 제공함으로써 양질의 주택을 신축할 수 있도록 지원하고 있다. 현재 보급되고 있는 농촌주택 표준모델은 건축면적 40.20m²부터 125.20m²까지 다양한 규모의 모델을 제시하고 있으며, 건축구조는 26가지 모델 중 15가지 모델이 목구조로 가장 많은 비중을 차지하고 있다. 목구조로 계획된 15가지의 농촌주택 표준도면을 검토한 결과 모두 현재의 에너지 절약 기준을 만족하고 있는 것으로 나타났다. 이에 분석 모델의 외벽과 지붕 구조체 구성은 가장 최근에 개발되었으며, 열 성능이 가장 높은 2014년 모델을 분석 대상으로 선정하였다.

외벽 구조체 구성은 실내 측에서부터 두께 9.5mm 석고보드 2겹 위 벽지 마감, 38x38mm 나무 각재 사이에 38mm 가등급 글라스울 단열재 충전, Sd값 100 이상의 방습지, 38x140mm 구조용 목재 스티드 사이에 두께 140mm 가등급 글라스울 충전, 두께 12mm OSB, 38x38mm 나무 각재 사이에 두께 38mm의 가등급 글라스울 충전, 외벽 투습방수지, 수직 방향의 20x38mm 방

부목, 수평 방향의 18x38mm 방부목, 두께 9mm CRC 보드 위 수성페인트 마감의 순서로 구성된다. 외벽 구성의 주요 특징으로는 실내에 별도의 추가 단열 및 설비층을 구성하여 설비배관이 기밀층을 훼손하지 않도록 하였으며, 스티드 외부에도 추가 단열층을 구성하여 스티드를 통한 열교를 차단하였다. 지붕 구조체 구성은 실내 측에서부터 두께 9.5mm 석고보드 2겹 위 벽지 마감, Sd값 100 이상의 방습지, 38x286mm 구조용 목재 서까래 사이에 서까래 벤트와 두께 280mm 가등급 글라스울 충전, 두께 12mm OSB, 방수시트, 아스팔트 싱글 마감 순서로 구성된다 <Table 2>. 지붕 구성의 주요 특징으로는 북미에서 많이 적용되는 서까래 벤트를 이용하여 통기층을 구성하였으며, 우리나라에서 건축되는 일반적인 경량목구조 지붕에서 많이 적용되고 있어 이에 대한 습·열 환경 성능 분석이 더욱 필요한 시점이다.

3.2 목조주택 표준모델

2019년 산림청에서는 목조주택 모델을 개발하여 목조주택 표준설계도를 국민들에게 제공함으로써, 높은 시공품질 및 일관된 성능의 목조주택을 건축할 수 있도록 지원하고 있으며, 이 용률이 저조한 국산 목재의 활용률을 증대시키고, 친환경성, 경제성, 에너지 효율성을 갖춘 보급형 표준 목조주택을 보급하고자 목조주택 표준설계도가 개발되었다. 목조주택 표준모델은 평면 계획의 유형에 따라 농가형 4가지 모델과 귀촌형 4가지 모델로 총 8가지 모델을 제시하고 있다. 농가형 모델은 귀농인, 귀어인, 귀산인들의 생활 특성을 고려하여 계획한 모델로 농기구 등을 보관할 수 있는 창고 공간과 재실 인원 증가를 고려한 별채 공간을 제시하고 있는 것이 특징이다. 농가형 모델은 지상 1층 규모에 다락이 있는 형태로 건축면적에 따라 84m², 110m²(A), 110m²(B), 136m²의 4가지 모델을 제시하고 있으며, 구조는 기둥-보를 이용한 중목구조와 경량목구조가 혼합된 구조를 적용하였다. 귀촌형 모델은 전원생활을 목적으로 하는 귀촌인의 생활 특성을 고려하여 계획한 모델로 다락과 연계된 발코니 공간과 취미를 즐길 수 있는 공간을 제시하고 있는 것이 특징이다. 농가형 모델과 같이 지상 1층 규모에 다락이 있는 형태로 건축면적에 따라 63m², 81m²(A), 81m²(B), 108m²의 4가지 모델을 제시하고 있으며, 구조는 기둥-보를 이용한 중목구조와 경량목구조가 혼합된 구조를 적용하였다.

분석 대상의 외벽 구조체 구성은 실내 측에서부터 두께 12.5mm 석고보드 위 벽지 마감, 방습지, 38x140mm 구조용 목재 스티드 사이에 두께 140mm 가등급 글라스울 단열재 충전, 두께 11.1mm OSB, 외벽 투습방수지, 두께 50mm 가등급 비드법단열재 위 스티코 마감의 순서로 구성된다. 외벽 구성의 주요 특징으로는 외벽의 단열 성능 보완 및 스티드를 통한 열교를 차단하기 위해 외단열 미장 마감 공법을 적용하였다.

분석 대상의 지붕 구조체 구성은 실내 측에서부터 두께 12.5mm 석고보드 위 벽지 마감, 38x286mm 서까래 사이에 두께 220mm 가등급 글라스울 충전, 지붕 투습방수지, 38x38mm 방부목, 두께 11.1mm OSB, 방수시트, 아스팔트 싱글 마감의 순서로 구성된다 <Table 4>. 지붕 구조체의 주요 특징으로는 농촌주택

9) 장성진 외 4명, 국내 농어촌 표준 목조주택의 Hygrothermal 성능 분석, 목재공학, 44(3), 2016, p.443.

10) 장성진, CLT 목조주택의 열습기 성능 평가, 숭실대학교 박사학위논문, 2018, p.135.

11) 이정훈, 경량목구조 패시브하우스 외피의 Hygrothermal 거동, 숭실대학교 박사학위논문, 2017, p.112.

표준모델과는 다르게 서까래 벤트를 이용한 통기층을 구성하지 않고, 방부목을 이용하여 단열층과 분리된 별도의 통기층을 구성하였으며, 단열층을 보호하기 위해 통기층과 단열층 사이에 지붕 투습방수지를 적용하였다.

이에 본 연구를 통해 서까래 벤트를 이용한 복미식 통기 방식과 별도의 외부 통기층을 구성하는 유럽식 통기 방식에 대한 습·열 환경적 측면에서의 성능 분석이 이루어질 것으로 판단된다.

4. 습·열 환경 성능 분석 및 개선 방안

4.1. 농촌주택 표준모델 외벽

외벽은 1년 차부터 다년간 수분 안정성을 확보하였으며, OSB의 최대 흡습량은 15.2 M.-%로 목질 재료의 구조적 안정성 확보 기준을 만족하였다. 단열재의 실외 측 표면의 최대 흡습량은 1.9 M.-%, 실내 측 표면은 5.4 M.-%로 결로 발생 위험에 대한

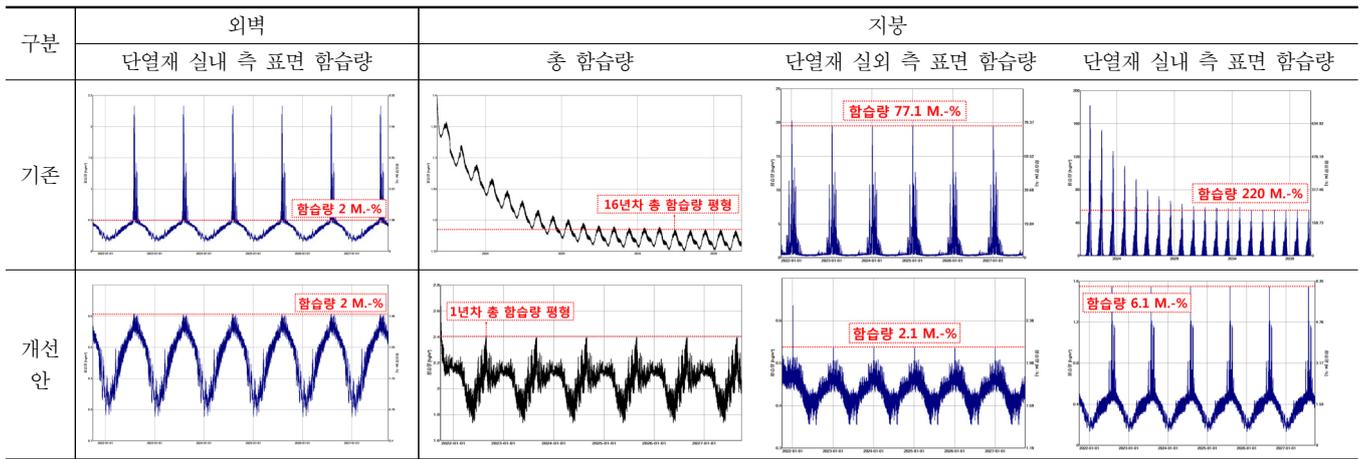
안정성도 확보한 것으로 나타났다. 단열재의 실외 측 표면의 곰팡이 지수는 0.01, 실내 측 표면은 0.4, 실내 마감면은 0으로 곰팡이 발생 위험에 대한 안정성을 확보한 것으로 나타났다. 그러나 실내 설비층에 설비 시설 설치로 인해 글라스울이 충전되지 않은 부위의 경우 단열재의 실내 측 표면의 곰팡이 지수는 0.84로 기준보다 높게 나타났다. 이는 여름철 실외 측에서 유입된 습기가 실내 방습지를 통과하지 못하고 단열재 실내 측 표면에 정체됨과 동시에 실내 냉방으로 인해 실내 표면 온도가 낮아짐으로써 습기가 정체된 단열재 실내 측 표면의 상대습도가 높아짐에 따라 곰팡이 발생 위험도도 상승한 것으로 판단된다 <Table 3> <Table 6>.

이에 개선 방안으로 기존 농촌주택 표준모델에 적용된 방습지 대신 주변의 상대습도에 따라 투습과 방습이 가변적으로 이루어지는 가변형 투습방습지의 적용을 제안하고, 이에 대한 습·열 환경 성능 분석을 진행하였다 <Table 2>. 개선안은 1년 차부터 다년간 수분 안정성을 확보하였으며, OSB의 최대 흡습량은 14.6 M.-%로 목질 재료의 구조적 안정성을 확보하였다. 단열재의 실외 측 표면의 최대 흡습량은 1.8 M.-%, 실내 측 표면은 2

Table 2. Modeling Information for Rural Housing Standard Model and Improvement Plans

	기존 외벽				외벽 개선안			
	건축자재	두께(mm)	투습저항계수	Sd값(m)	건축자재	두께(mm)	투습저항계수	Sd값(m)
기존 외벽	CRC 보드	9	219	1.97	CRC 보드	9	219	1.97
	통기층(방부목)	38	0.56	0.02	통기층(방부목)	38	0.56	0.02
	투습방수지	1	100	0.1	투습방수지	1	100	0.1
	글라스울	38	1	0.04	글라스울	38	1	0.04
	OSB	12	175	2.1	OSB	12	175	2.1
	글라스울	140	1	0.14	글라스울	140	1	0.14
	방습지	1	100000	100	가변형 투습방습지	1	300/34000	0.3/34
	글라스울	38	1	0.04	글라스울	38	1	0.04
	석고보드	19	7.03	0.13	석고보드	19	7.03	0.13
	합지벽지	1	3000	3	합지벽지	1	3000	3
기존 지붕	아스팔트 싱글	3	2730	8.19	아스팔트 싱글	3	2730	8.19
	방수시트	1	82941	82.9	방수시트	1	82941	82.9
	OSB	12	175	2.1	OSB	12	175	2.1
	통기층	38	0.56	0.02	통기층(방부목)	38	0.56	0.02
	PE(서까래 벤트)	1	10000	10	투습방수지	1	100	0.1
	글라스울	242	1	0.24	OSB	12	175	2.1
	방습지	1	100000	100	글라스울	280	1	0.28
	석고보드	19	7.03	0.133	가변형 투습방습지	1	300/34000	0.3/34
	합지벽지	1	3000	3	석고보드	19	7.03	0.133
	합지벽지	1	3000	3	합지벽지	1	3000	3

Table 3. Water Contents of Rural Housing Standard Model



M-%로 결로 발생 위험에 대한 안정성도 확보하였다. 단열재의 실외 측 표면의 곰팡이 지수는 0, 실내 측 표면은 0.02, 실내 마감면은 0으로 곰팡이 발생 위험에 대한 안정성도 확보한 것으로 나타났다. 단열재가 적용되지 않는 설비층 부위의 곰팡이 지수는 기존 0.84에서 0.15로 낮아지며, 기존 외벽에서 곰팡이 발생 위험에 대한 안정성을 확보하지 못하였던 부위까지 안정성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다 <Table 3> <Table 6>. 결과적으로 기존 농촌주택 표준모델의 외벽 구조체가 습열 환경 성능 측면에서 충분한 안정성을 확보하기 위해서는 방습지보다 가변형 투습방습지의 적용이 효과적일 것으로 판단된다.

4.2. 농촌주택 표준모델 지붕

서까래 벤트가 설치된 부위의 지붕은 1년 차부터 다년간 수분 안정성을 확보하였으며, OSB의 최대 합습량은 13.3 M-%로 목질 재료의 구조적 안정성을 확보하였다. 단열재의 실외 측 표면의 최대 합습량은 77.1 M-%, 실내 측 표면은 23.7 M-%로 결로는 발생하지 않는 것으로 나타났으나, 실외 측 표면의 합습량이 매우 높아 결로 발생 위험에 대한 안정성을 충분히 확보하였다고 보기에는 어렵다고 판단된다. 이는 일반적으로 서까래 벤트가 투습 성능이 낮은 폴리에틸렌 소재로 만들어져 구조체 내부의 습기가 외부로 원활히 배출되지 못하고 단열재 실외 측 표면에 정체되도록 한다. 이와 동시에 겨울철 차가운 공기가 서까래 벤트를 통과하면서 서까래 벤트의 표면 온도는 낮아진다. 이에 단열재의 실외 측 표면에 정체된 다량의 습기가 온도가 낮아진 서까래 벤트와 접하면서 상대습도가 높아져 결로 발생 위험성을 높인 주요 원인으로 판단된다. 단열재 실외 측 표면의 곰팡이 지수는 1.52, 실내 측 표면은 2.44, 실내 마감면은 0으로 실내 마감면에서의 곰팡이 발생 위험성은 없지만, 단열재의 실내 외 측 표면 모두 곰팡이 발생 위험에 대한 안정성을 확보하지 못하는 것으로 나타났다 <Table 3> <Table 6>.

서까래 벤트가 없는 부위의 지붕은 총 합습량이 시간이 지남에 따라 점차 감소하면서 16년 차부터 수분 안정성을 확보하였다. 경량목구조의 경우 3년 내에 다년간 수분 안정성을 확보하지 못할 경우 하자 발생 위험성이 높은 것으로 판단하며, 안정

화되기까지의 기간이 길어질수록 구조체 내부의 습기 건조 성능이 매우 낮은 것을 의미한다. 농촌 주택 표준모델의 지붕에서는 실외 측에 적용된 방수시트와 실내 측에 적용된 방습지의 투습 성능이 매우 낮아 구조체 내부의 습기가 실내 외 측 어느 방향으로도 충분한 건조가 이루어질 수 없는 구조로 구성된 것이 문제 발생의 주요 원인인 것으로 판단된다. OSB의 합습량은 13.5 M-%로 목질 재료의 구조적 안정성을 확보하였다 <Table 3> <Table 6>. 단열재 실외 측 표면의 합습량은 2.1 M-%로 결로 발생의 위험성은 없는 것으로 나타났으나 실내 측 표면의 최대 합습량은 초기에 723 M-%까지 상승하였으며, 시간이 지남에 따라 점차 감소하였음에도 불구하고 안정화 단계에서의 최대 합습량은 220 M-%로 결로 발생 위험성이 매우 높은 것으로 나타났다.

단열재 실내 측 표면에 합습량이 급격하게 상승하는 시점이 여름철인 것으로 보았을 때 이는 여름철 구조체 내부의 습기가 실내 방습지를 투과하지 못하고 정체되어 발생하는 역결로 현상이 주요 원인인 것으로 판단된다. 단열재의 실외 측 표면의 곰팡이 지수는 0, 실내 측 표면은 6, 실내 마감면은 0으로 단열재의 실외 측 표면과 실내 마감면에서의 곰팡이 발생 위험성은 없지만, 단열재의 실내 측 표면은 곰팡이 발생 위험이 매우 높은 것으로 나타났다 <Table 3> <Table 6>.

농촌주택 표준모델 지붕 구조체의 습열 환경 성능을 분석한 결과 다년간 수분 안정성을 기간 내에 확보하지 못하였으며, 단열재의 실내 측 표면에 결로 발생 위험성이 높고, 단열재의 실내 외 측 표면에서 곰팡이 발생 위험성이 높은 것으로 나타났다. 이에 습열 환경 성능 개선 방안으로 기존의 서까래 벤트를 이용한 통기 방식 대신 방부목과 지붕 투습방수지를 이용하여 투습이 가능한 별도의 외부 통기층을 구성하고, 기존 실내 방습지 대신 가변형 투습방습지를 적용하여 여름철 역결로에 대비할 수 있도록 개선 방안을 제시하였다 <Table 2>.

개선 방안을 적용한 지붕의 습열 환경 성능 분석결과 1년차부터 다년간 수분 안정성을 확보하였으며, OSB의 최대 합습량은 13.3 M-%로 목질 재료의 구조적 안정성을 확보하였다. 단열재의 실외 측 표면의 최대 합습량은 2.1 M-%, 실내 측 표면은

6.1 M.-%로 결로 발생 위험에 대한 안정성도 확보하였다. 단열재의 실외 측 표면의 곰팡이 지수는 0.41, 실내 측 표면은 0, 실내 마감면은 0으로 곰팡이 발생 위험에 대한 안정성도 확보한 것으로 나타났다 <Table 3> <Table 6>. 결과적으로 기존 농촌주택 표준모델의 외벽 구조체가 습·열 환경 성능 측면에서 충분한 안정성을 확보하기 위해서는 투습이 가능한 별도의 외부 통기층을 구성하고, 실내에 방습지 대신 가변형 투습방습지를 설치하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.

4.3. 목조주택 표준모델 외벽

90년대 중반 북아메리카에서는 경량목구조에 외단열 미장 마감 공법을 적용한 건축물에서 습기로 인한 피해들이 다수 발생한 사례가 있으며, 주로 외단열이 부착된 목질 판상재가 부식되는 문제가 발생하였다 <Fig. 1>. 이에 ASRAE 160에서는 시공 과정에서 작은 틈새도 발생되지 않는 것은 현실적으로 불가능하기 때문에 외단열 미장 마감을 적용한 모델에 대한 습·열 환경 성능 계산 시 전체 우수량의 1%는 외단열층의 뒷면까지 유입된다는 조건을 적용하고 이에 대한 건조가 충분히 이루어지는가에 대한 검토를 진행하도록 제시하고 있다. 이에 외단열 미장마감을 적용한 목조주택 표준모델 외벽의 습·열 환경 성능 계산 시 ASHRAE 160 기준에서 제시하고 있는 조건을 적용하여 분석을 진행하였다.



Fig. 1. Cases of Defects in Lightweight Wooden Structure Walls with External Thermal Insulation Composite Systems¹²⁾

외벽은 4년 차부터 다년간 수분 안정성을 확보하였으며, OSB의 최대 함습량은 22 M.-%로 기준인 18 M.-%를 초과하여 목질 재료의 구조적 안정성을 확보하지 못하는 것으로 나타났다. 단열재의 실외 측 표면의 최대 함습량은 3.2 M.-%로 결로 발생 위험은 없는 것으로 나타났으나 실내 측 표면은 310 M.-%로 결로 발생 위험성이 매우 높은 것으로 나타났다. 단열재의 실외 측 표면의 곰팡이 지수는 6, 실내 측 표면은 5.11, 실내 마감면은 0으로 단열재 실내외 측 표면에서는 곰팡이 발생 위험성이 매우 높은 것으로 나타났다 <Table 5> <Table 6>.

분석 결과 다년간 수분 안정성, 목질 재료의 구조적 안정성, 결로 곰팡이 발생 위험성에 대한 안정성 모두 확보하지 못하는 것으로 나타났다. 외부에 적용된 EPS 단열재, OSB, 글라스울 단열재의 함습량을 분석한 결과 여름철에 급격하게 상승하는

특징을 보이며, 이는 여름철 외단열 미장 마감층을 넘어 유입된 빗물이 실내 방습지로 인해 실내로 충분히 건조되지 못하고 정체되며 여름철 역결로 현상이 발생된 것으로 판단된다. 또한 외부에 적용된 외단열 미장 마감층으로 인해 구조체 내부의 습기가 실외 측으로도 원활하게 건조되지 않아 EPS 단열재와 면하는 OSB의 함습량을 높이는 주요 원인으로 판단된다 <Table 5>.

이에 개선 방안으로 기존 실외에 적용된 EPS 단열재 대신 투습 성능이 높은 미네랄울 단열재를 설치하고, 기존에 적용된 실내 방습지 대신 가변형 투습방습지를 설치하여 여름철 구조체 내부의 습기가 실내로 건조될 수 있도록 제한하였다. 또한 기존 스트리트 사이에 적용된 글라스울 단열재 대신 모세관 현상을 갖는 셀룰로오스 단열재를 설치하여 구조체 내부의 습기가 한쪽에 집중되지 않고 고르게 분배될 수 있도록 개선 방안을 제시하였다 <Table 4>.¹³⁾ 개선 방안을 적용한 외벽의 습·열 환경 성능 분석 결과 1년 차부터 다년간 수분 안정성을 확보하였으며, OSB의 최대 함습량은 17.5 M.-%로 목질 재료의 구조적 안정성 기준인 18 M.-% 미만을 만족하였지만, 충분한 안정성을 확보하였다고 보기에는 어렵다고 판단된다. 단열재의 실외 측 표면의 최대 함습량은 61.5 M.-%, 실내 측 표면은 21.3 M.-%로 결로 발생 위험에 대한 안정성도 확보하였다. 단열재의 실외 측 표면의 곰팡이 지수는 4.35, 실내 측 표면은 0.04, 실내 마감면은 0으로 단열재의 실외 측 표면의 곰팡이 발생 위험에 대한 안정성은 확보하지 못한 것으로 나타났다 <Table 5> <Table 6>.

결과적으로 개선안 적용 시 단열재의 실외 측 표면의 곰팡이 발생 위험성을 제외한 모든 안정성을 확보할 수 있었다. 그럼에도 불구하고 단열재의 실외 측 표면의 곰팡이 발생 위험성이 높고, OSB의 구조적 안정성을 충분히 확보하지 못하였다는 측면에서 경량목구조 건물에 외단열 미장 마감 공법을 적용하는 것은 가급적 지양하고, 단열재 채움 방식과 외부 통기가 원활한 레인스크린을 구성하는 방식을 적용하는 것이 습·열 환경 성능을 확보하는 측면에서 효과적일 것으로 판단된다.

4.4. 목조주택 표준모델 지붕

지붕은 1년 차부터 다년간 수분 안정성을 확보하였으며, OSB의 최대 함습량은 13.2 M.-%로 목질 재료의 구조적 안정성을 확보하는 것으로 나타났다 <Table 6>. 단열재의 실외 측 표면의 최대 함습량은 1.9 M.-%, 실내 측 표면은 2 M.-%로 결로 발생 위험에 대한 안정성을 확보한 것으로 나타났다. 단열재의 실외 측 표면의 곰팡이 지수는 0, 실내 측 표면은 0.69, 실내 마감면은 0으로 단열재 실내 측 표면에 곰팡이 발생 위험에 대한 안정성은 확보하지 못하는 것으로 나타났다.

분석 결과 실내 측 표면에 곰팡이 발생 위험에 대한 안정성을 확보하지 못한 것 이외에는 모든 부분에서 안정성을 확보하고 있는 것으로 나타났다. 이는 구조체의 실내외 측 모두 투습 성능이 매우 높은 자재들로 구성되어 있어 구조체 내부에 습기

12) Fraunhofer, Effects of Moisture and Hygrothermal Performance Evaluation in Building Practice, WUFI Basic Course, 2013, p.7.

13) 김경수 외 4명, 내부결로 평가방법에 따른 총 함습량 비교, 한국건축환경설비학회 논문집, 11(6), 2017, p.561.

가 정체되지 않고 실내의 측 방향으로 원활하게 건조됨으로써 안정성을 확보할 수 있는 것으로 판단된다. 특히 실내에 방습층이 없음에도 불구하고 실외 측 표면의 투습성능이 매우 높아 빠른 건조가 이루어져 겨울에도 단열재의 실외 측 표면의 함습량이 급격히 높아지는 현상이 발생하지 않는 것으로 나타났다. 또한 실내 측 표면의 투습성능도 매우 높아 여름철 습기 정체로

인한 역결로 현상도 발생하지 않는 것으로 나타났다.

그러나 실내에 적용되는 방습지나 가변형 투습방습지는 습기를 차단하는 목적 이외에도 연결 부위가 많은 목조 건물의 기밀성능을 확보하기 위한 구조로서의 기능을 가지고 있다. 목조 건물에서 높은 기밀성능을 확보하기 위해서는 반드시 실내에 기밀층을 형성할 필요가 있다. 이에 목조주택 표준모델 지붕 구

Table 4. Modeling Information for Wooden House Standard Model and Improvement Plans

	기존 외벽				외벽 개선안	기존 지붕				지붕 개선안
	건축자재	두께(mm)	투습저항계수	Sd값(m)		건축자재	두께(mm)	투습저항계수	Sd값(m)	
기존 외벽	스터코	3	1000	3	외벽 개선안	스터코	3	1000	3	지붕 개선안
	비드법단열재	50	30	1.5		미네랄울	50	1.3	0.07	
	투습방수지	1	100	0.1		투습방수지	1	100	0.1	
	OSB	11	175	1.93		OSB	11	175	1.93	
	글라스울	140	1	0.14		셀룰로오스	140	1.5	0.21	
	방습지	1	20000	20		가변형 투습방습지	1	300/34000	0.3/34	
	석고보드	13	7.03	0.09		석고보드	13	7.03	0.09	
	합지벽지	1	3000	3		합지벽지	1	3000	3	
기존 지붕	아스팔트 싱글	3	2730	8.19	지붕 개선안	아스팔트 싱글	3	2730	8.19	지붕 개선안
	방수시트	1	82941	82.9		방수시트	1	82941	82.9	
	OSB	12	175	2.1		OSB	12	175	2.1	
	통기층(방부목)	38	0.56	0.02		통기층(방부목)	38	0.56	0.02	
	투습방수지	1	100	0.1		투습방수지	1	100	0.1	
	공기층(빈 공간)	66	0.23	0.02		셀룰로오스	220	1.5	0.33	
	글라스울	220	1	0.22		가변형 투습방습지	1	300/34000	0.3/34	
	석고보드	13	7.03	0.09		석고보드	13	7.03	0.09	
합지벽지	1	3000	3	합지벽지	1	3000	3			

Table 5. Water Contents of Wooden House Standard Model

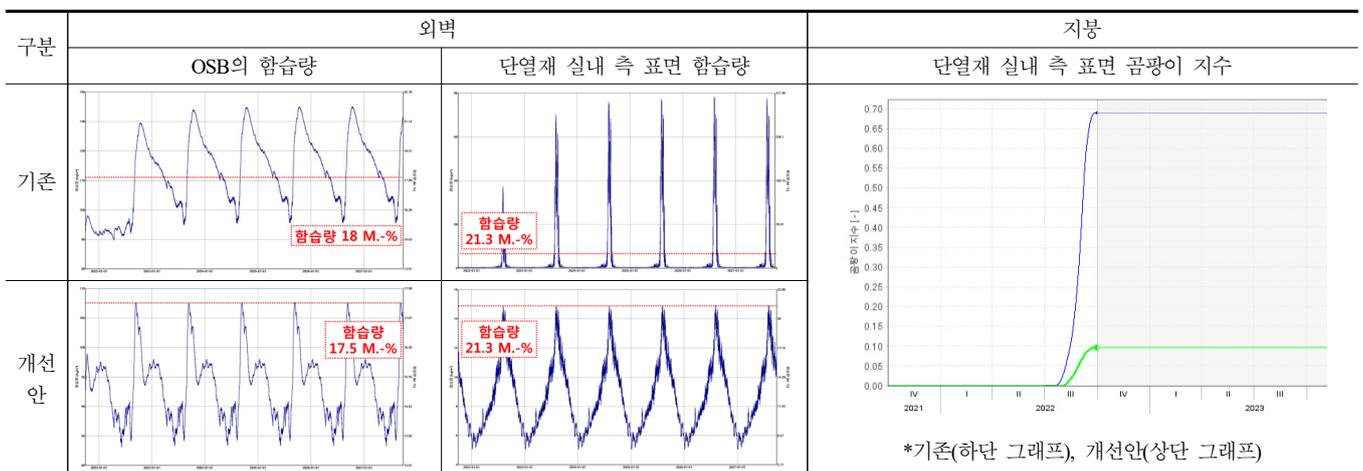


Table 6. Results of Hygrothermal Performance Analysis of Existing Standard Model Structures and Improvement Plans

구분		농촌주택 표준모델				목조주택 표준모델				안정성 기준
		외벽		지붕		외벽		지붕		
		기존	개선안	기존	개선안	기존	개선안	기존	개선안	
다년간 수분 안정 시점		1년	1년	16년	1년	4년	1년	1년	1년	< 4년
목질 판상재 최대 흡습량 (M-%)		15.2	14.6	13.5	13.3	22	17.5	13.2	13.3	< 18
단열재 최대 흡습량 (M-%)	실외 측 표면	1.9	1.8	77.1	2.1	3.2	61.5	1.9	19	< 100
	실내 측 표면	9.3	2.0	220	6.1	310	21.3	2	24.1	
곰팡이 지수	실외 측 표면	0.01	0	1.52	0.41	6	4.35	0	0	< 0.5
	실내 측 표면	0.84	0.02	6	0	5.11	0.04	0.69	0.38	
	실내 마감면	0	0	0	0	0	0	0	0	

*음영표시 : 안정성을 확보하지 못한 수치

조체의 기존 구성을 바탕으로 실내 측에 가변형 투습방습지를 적용한 모델을 대상으로 습·열 환경 성능 분석을 진행한 결과 단열재의 실내 측 표면의 최대 흡습량이 기존 2에서 65.1%까지 증가하였으며, 동일 부위에 곰팡이 지수는 기존 0.69에서 3.0으로 증가하여 곰팡이 발생 위험성이 더욱 높아지는 것으로 나타났다.

구조체의 실외 측 표면의 투습능이 매우 높아 여름철 외부의 습기가 실내 측 방향으로 다량 유입되어 가변형 투습방습지를 투과하지 못한 습기가 단열재 실내 측 표면에 정체되는 것으로 나타났다. 이에 개선 방안으로 목조주택 표준모델 지붕 구성에서 실내 측에 가변형 투습방습지를 적용하여 기밀성을 확보하고, 정체되는 습기를 분산하기 위해 기존 글라스울 대신 모세관 현상을 갖는 셀룰로오스 단열재를 사용하는 개선 방안을 제안하였다 <Table 4>. 개선 방안을 적용한 지붕의 습·열 환경 성능 분석 결과 1년 차부터 다년간 수분 안정성을 확보하였으며, OSB의 최대 흡습량은 13.3 M-%로 목질 재료의 구조적 안정성을 확보하는 것으로 나타났다 <Table 6>. 단열재의 실외 측 표면의 최대 흡습량은 1.9 M-%, 실내 측 표면은 24.1 M-%로 결로 발생 위험에 대한 안정성을 확보한 것으로 나타났다. 단열재의 실외 측 표면의 곰팡이 지수는 0, 실내 측 표면은 0.38, 실내 마감면은 0으로 모든 부위에서 곰팡이 발생 위험에 대한 안정성을 확보하는 것으로 나타났다. 결과적으로 기존 목조주택 표준 모델의 지붕 구조체에 실내 가변형 투습방습지와 모세관 현상을 갖는 셀룰로오스 단열재를 적용할 경우 건물의 기밀성과 습·열 환경 성능을 모두 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

5. 결론

최근 귀농 귀촌 인구가 증가하면서 농촌 지역에 단독주택 수요가 늘어나고 있다. 정부에서는 귀농 귀촌 가구를 위해 농촌주택 표준모델과 목조주택 표준모델을 개발하여 보급하고 있으며, 시대의 흐름에 발맞춰 농촌 주택 표준 모델들의 건축물 에너지 성능이 높아지고 건물은 더욱 기밀하게 설계되고 있다.

농촌주택 표준모델의 에너지 성능이 높아짐에 따라 결로와

곰팡이와 같은 습·열 환경 성능 측면에서의 하자 발생 위험은 더욱 높아짐에도 불구하고 농촌주택 표준모델들의 습·열 환경 성능에 대한 검토나 개선은 전혀 이루어지지 않고 있는 실정이다.

이에 본 논문에서는 농촌주택 표준모델과 목조주택 표준모델을 대상으로 습·열 환경 성능 확보 여부를 검토하고, 기존 모델의 습·열 환경 성능을 확보하기 위한 개선방안을 제안하였다. 분석 대상 모델은 모두 습·열 환경 성능 측면에서 안정성을 확보하지 못하는 부위들이 있었으며, 이에 대한 원인을 분석하고, 개선 방안을 제시하는 과정에서 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

첫째, 구조체의 실외 측 표면은 반드시 투습이 원활한 구조로 구성하며, 실내 측 표면은 여름철 역결로 현상을 고려하여 가변형 투습방습지를 적용한다.

둘째, 외벽 구성 시 외단열 미장 마감을 적용한 모델 보다 중 단열에 레인스크린을 적용한 모델에서 안정적인 습·열 환경 성능을 나타냈다.

셋째, 지붕 구성 시 서까래 벤트를 적용한 모델 보다 투습방수지로 단열층과 분리된 별도의 통기층을 구성한 모델에서 안정적인 습·열 환경 성능을 나타냈다.

넷째, 셀룰로오스 단열재와 같이 모세관 현상을 갖는 단열재를 적용할 경우 더욱 안정적인 습·열 환경 성능을 확보할 수 있다.

추후 연구에서는 본 논문에서 다루지 못한 경량목구조 구성 방식에 대해 습·열 환경 성능을 분석하고, 나아가 철근콘크리트나 조적조로 이루어진 농촌주택 표준모델의 습·열 환경 성능 개선 방안을 도출하기 위한 연구를 진행하고자 한다.

참고문헌

- 김경수 외 4명, 내부결로 평가방법에 따른 총 흡습량 비교, 한국건축친환경설비학회 논문집, 11(6), 2017.
- 국토교통부, 건축물의 에너지절약설계기준 해설서, 국토교통부고시 제2017-881호, 2017.12.28. 일부개정, 시행 2018.
- 권혜주, 최정만, 습열 거동 분석을 통한 국내 에너지절약설계기준의

- 방습층에 관한 문제점 분석, 한국생활환경학회지, 26(1), 2019.
7. 농림축산식품부·농어촌공사, 농촌주택 표준설계도 종합안내서, 2019.
 8. 산림청, 목조주택표준설계도 리플렛, 2019.
 3. 이정훈, 경량목구조 패시브하우스 외피의 Hygrothermal 거동, 숭실대학교 박사학위논문, 2017.
 4. 장성진, CLT 목조주택의 열습기 성능 평가, 숭실대학교 박사학위논문, 2018.
 5. 장성진 외 4명, 국내 농어촌 표준 목조주택의 Hygrothermal 성능 분석, 목재공학, 44(3), 2016.
 9. DIN 4108 Thermal Protection and Energy Economy in Building, 1969.
 10. Fraunhofer, Effects of Moisture and Hygrothermal Performance Evaluation in Building Practice, WUFI Basic Course, 2013.
 11. KS M 3808, KS M 3809, KS L 9102, KS M ISO 4898, KS F 5660에 의한 단열재의 열전도율.

접 수 일 자 : 2021. 10. 10
 초 심 완 료 일 자 : 2021. 11. 16
 채심(1차)완료일자 : 2021. 11. 19
 계 재 확 정 일 자 : 2021. 11. 23