creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학석사학위논문

신한옥 지붕의 열교 현상을 고려한 열 성능 비교 평가 및 개선 방안

Thermal Performance Improvement of the Roof of New Hanok through Comparative Evaluation Considering Thermal Bridge Effects

2015 년 8월

서울대학교 대학원

건 축 학 과

임 태 구

국문 초록

전통한옥에 비해 열 성능이 강화된 신한옥은 다양한 주체에 의해 보급되고 있는 새로운 주거 형태이다. 신한옥은 열 성능이 크게 향상되었다는 점이 강조되고 있지만, 대부분 단열재가 시공되었다는 사실 외에 정량적인 열 성능에 대한 값이 제시되지 않거나, 1차원적인 열전달 계산법에 의한 근삿값만 제시되고 있다. 접합 부위가 많고 3차원의 복잡한 형태를 갖는 신한옥 지붕은 창호와 벽체 등과 달리 열전달 특성 또한 복잡하여 열 성능 수준이나 열교 발생 여부 등을 판단하는 것에 어려움이 따른다. 이에 따라 본 연구는 신한옥 지붕의 정량적인 열 성능을 다른 형태의 주택 지붕과 비교 평가하고, 열 성능 저하 원인을 분석하여 열 성능 개선 방안을 제시하는 것을 목표로 진행되었다.

신한옥과 전통한옥, 현대 주택, 패시브하우스 지붕의 정량적인 열 성능을 계산하기 위하여 전열해석 방법을 이용하였다. 신한옥 지붕의 열전달에 대한 정성적 분석을 반영한 전열해석을 통해 신한옥과 전통한옥, 현대 주택 및 패시브하우스 지붕의 열 성능을 정량적으로 비교, 분석하였다. 분석 결과를 바탕으로 신한옥 지붕에서 추가적인 열손실이 발생하는 열교 부위와 발생 원인을 규명한 뒤, 신한옥 지붕의 열 성능을 향상시키기 위한 열교 부위의 단열 개선 방안을 제시하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 신한옥과 전통한옥, 현대 주택, 패시브하우스 지붕의 전열해석 결과, 신한옥 지붕의 전체적인 열 성능은 전통한옥에 비해서는 대폭 개선된 것을 확인하였다. 그러나 비슷한 단열 수준을 가진 현대 주택이나 패시브하우스에 비해서는 여전히 개선될 필요가 있다.

2) 지붕의 부위 별 열유속을 비교하여 전체 열손실 중 열교에 의한 열손실의 비율을 확인한 결과, 신한옥은 전체적인 열 성능이 더 낮음에도 열교에 의한 열손실 비율이 더 높게 나타났다. 신한옥의 지붕은 열교 부위의 열 성능 저하가 일반적인 주택에 비해 더 큰 것으로 나타났다.

3) 신한옥 지붕은 단열재를 관통하여 시공되거나 단열이 시공되지 않는 모든 부재에서 열교가 발생하였다. 위치에 따라 열교에 의한 영향 정도는 상이하지만, 대부분 전통한옥의 형태를 그대로 따르기 때문에 발생하는 부재 간 간섭에 의해 발생하는 것으로 파악되었다. 신한옥 지붕의 열교 발생 부위에서 단열재가 연속하여 시공될 수 있도록 단열의 개선 방안을 적용한 결과, 열 성능이 개선된 신한옥 지붕은 현대 주택보다 높은 열 성능을 보였으며, 패시브하우스의 지붕과 비슷한 수준까지 열 성능이 향상되었다. 열교가 상대적으로 많이 발생하는 신한옥의 지붕도 부위 별로 개선이 이루어진다면 충분히 현대 주택 이상의 열 성능을 확보할 수 있는 것을 확인하였다.

주요어 : 신한옥, 지붕, 열교, 열 성능, 열관류율, 열전달, 전열해석

학 번 : 2013-23027

목 차

제 1 장 서 론 ····· 1
1.1 연구의 배경 및 목적 ····· 1
1.2 연구의 범위 및 방법 ····· 3

제 2 장 신한옥 지붕의 열 성능 평가를 위한 예비적 고찰 ····· 7
2.1 개요 ····· 7
2.2 신한옥 정의 및 신한옥 지붕의 구성 요소 ····· 7
2.2.1 신한옥의 정의와 범위 ····· 7
2.2.2 신한옥 지붕의 구성 요소 ····· 11
2.3 지붕의 열 성능에 관한 선행 연구 ····· 14
2.3.1 지붕의 열전달 해석 모델에 관한 연구 ····· 14
2.3.2 지붕의 열 성능 정밀 평가에 관한 연구 ····· 18
2.4 수치해석 이론 ····· 22
2.4.1 편미분 방정식의 수치해석 과정 ····· 22
2.4.2 이산화 방법의 장단점 비교 ····· 23
2.5 소결 ····· 26

제 3 장 신한옥 지붕의 열 성능 비교 평가 ····· 28
3.1 개요 ····· 28
3.2 신한옥 지붕의 부위 별 열전달 정성적 분석 ····· 28
3.2.1 지붕면을 통한 열전달 분석 ····· 28
3.2.2 당골막이와 박공벽을 통한 열전달 분석 ····· 29
3.3 신한옥 지붕의 열 성능 비교 평가 방법 ····· 31
3.3.1 열 성능 평가 도구 ····· 31
3.3.2 실내·외 환경 경계 조건 ····· 31
3.3.3 주택 유형 별 평가 대상 지붕 모델 ····· 34
3.4 열 성능 평가 결과 ····· 46
3.4.1 신한옥 지붕 모델의 전열해석 결과 ····· 46

3.4.2 전통한옥 지붕 모델의 전열해석 결과 ····· 50
3.4.3 현대 주택 지붕 모델의 전열해석 결과 ····· 53
3.4.4 패시브하우스 지붕 모델의 전열해석 결과 ····· 55
3.5 열 성능 평가 결과 검증 ····· 58
3.5.1 전열해석 결과 검증 개요 ····· 58
3.5.2 전열해석 결과 검증 ····· 60
3.6 소결 ····· 64

제 4 장 신한옥 지붕의 열 성능 분석 및 개선 방안 ····· 66
4.1 개요 ····· 66
4.2 신한옥 지붕의 열 성능 평가 결과 분석 ····· 66
4.2.1 주택 형태 별 지붕의 실내 표면 온도 비교 분석 ····· 66
4.2.2 주택 형태 별 지붕의 평균 열관류율 비교 분석 ····· 68
4.2.3 주택 형태 별 지붕의 열 성능에 대한 열교의 영향 분석 · 72
4.2.4 신한옥 지붕의 열교 발생 부위 분석 ····· 76
4.3 신한옥 지붕의 부위 별 열 성능 개선 방안 ····· 84
4.3.1 신한옥 지붕 상부의 열 성능 개선 방안 ····· 84
4.3.2 신한옥 지붕 하부 및 당골막이 부위의 열 성능 개선 방안 · 85
4.3.3 신한옥 지붕의 박공벽 부위의 열 성능 개선 방안 ····· 88
4.3.4 신한옥 지붕의 열 성능 개선 시 효과 ····· 89
4.4 소결 ····· 96

제 5 장 결 론 ····· 98

참고 문헌 ····· 100

ABSTRACT ····· 104

표 목차

<표 2.1> 기존 연구보고서 내 신한옥의 정의 현황 ····· 8
<표 2.2> 관련 법 및 지자체 조례별 한옥 정의 ····· 10
<표 2.3> 지붕의 열전달 해석 모델 제작 시 추가적 고려사항 ····· 16
<표 2.4> 현재까지 개발된 지붕의 열 해석 모델과 각각의 고려사항 ····· 16
<표 2.5> 이산화 방법 별 장단점 비교 ····· 25
<표 3.1> 실내온도 표준 조건 관련 자료 ····· 32
<표 3.2> 동계 외기온도 표준 조건 관련 자료 ····· 32
<표 3.3> 실내 및 실외측 표면 열전달계수 ····· 33
<표 3.4> 신한옥 지붕 모델에서 사용된 재료의 열전도율 ····· 38
<표 3.5> 전통한옥 지붕 모델에서 사용된 재료의 열전도율 ····· 39
<표 3.6> 현대 주택의 벽체에서 사용된 재료의 두께 및 열저항 ····· 42
<표 3.7> 현대 주택의 지붕에서 사용된 재료의 두께 및 열저항 ····· 42
<표 3.8> 패시브하우스의 벽체에서 사용된 재료의 두께 및 열저항 ····· 43
<표 3.9> 패시브하우스의 지붕에서 사용된 재료의 두께 및 열저항 ····· 44
<표 3.10> 신한옥 지붕면 부위 모델 내부 표면 온도 ····· 47
<표 3.11> 신한옥 지붕면 부위 모델 부재 별 열유속 ····· 47
<표 3.12> 신한옥 박공벽 부위 모델 내부 표면 온도 ····· 49
<표 3.13> 신한옥 박공벽 부위 모델 부재 별 열유속 ····· 49
<표 3.14> 전통한옥 지붕면 부위 모델 내부 표면 온도 ····· 50
<표 3.15> 전통한옥 지붕면 부위 모델 부재 별 열유속 ····· 51
<표 3.16> 전통한옥 박공벽 부위 모델 내부 표면 온도 ····· 52
<표 3.17> 전통한옥 박공벽 부위 모델 부재 별 열유속 ····· 52
<표 3.18> 현대 주택 지붕면 부위 모델 내부 표면 온도 ····· 53
<표 3.19> 현대 주택 지붕면 부위 모델 부재 별 열유속 ····· 54
<표 3.20> 현대 주택 박공벽 부위 모델 내부 표면 온도 ····· 55
<표 3.21> 현대 주택 박공벽 부위 모델 부재 별 열유속 ····· 55

<표 3.22> 패시브하우스 지붕면 부위 모델 내부 표면 온도 ····· 56
<표 3.23> 패시브하우스 지붕면 부위 모델 부재 별 열유속 ····· 56
<표 3.24> 패시브하우스 박공벽 부위 모델 내부 표면 온도 ····· 57
<표 3.25> 패시브하우스 박공벽 부위 모델 부재 별 열유속 ····· 57
<표 3.26> 열화상 카메라의 사양 ····· 58
<표 3.27> 열화상 사진의 보정을 위한 입력 조건 ····· 59
<표 3.28> 휴대용 열류량계의 사양 ····· 59
<표 3.29> 인용 자료에서 제시된 현대 주택과 패시브하우스의 열관류율 ····· 59
<표 3.30> 신한옥 지붕의 부위 별 표면온도 ····· 62
<표 3.31> 신한옥 지붕의 부위 별 표면 열유속 ····· 62
<표 4.1> 주택 유형 별 모델의 평균 실내 표면온도 ····· 66
<표 4.2> 주택 유형 별 모델의 온도차비율 ····· 68
<표 4.3> 주택 유형 별 지붕의 평균 열관류율 ····· 70
<표 4.4> 주택 유형 별 지붕의 일반 면 부위에서의 열관류율 ····· 71
<표 4.5> 신한옥 지붕 주요 표면에서의 열유속 비교 ····· 73
<표 4.6> 전통한옥 지붕 주요 표면에서 열유속 비교 ····· 73
<표 4.7> 현대 주택 지붕 주요 표면에서의 열유속 비교 ····· 74
<표 4.8> 패시브하우스 지붕 주요 표면에서의 열유속 비교 ····· 75
<표 4.9> 주택 유형 별 지붕의 주요 표면에서의 열교에 의한 열손실 비율 비교 ··· 76
<표 4.10> 주택 유형 별 지붕면 상부 모서리의 열유속 비교 ····· 77
<표 4.11> 주택 유형 별 벽체-지붕 접합부 모서리의 열유속 비교 ····· 80
<표 4.12> 주택 유형 별 지붕면-박공벽 접합부 모서리의 열유속 비교 ····· 81
<표 4.13> 신한옥 지붕의 열교 미발생 부위와 최대 발생 부위의 열유속 비교 ··· 83
<표 4.14> 신한옥 지붕면 부위 모델의 열 성능 개선에 따른 표면온도 비교 ····· 91
<표 4.15> 신한옥 지붕면 부위 모델의 열 성능 개선에 따른 열유속 비교 ····· 91
<표 4.16> 신한옥 박공벽 부위 모델의 열 성능 개선에 따른 표면온도 비교 ····· 94
<표 4.17> 신한옥 박공벽 부위 모델의 열 성능 개선에 따른 열유속 비교 ····· 94
<표 4.18> 신한옥 지붕의 열 성능 개선에 따른 평균 열관류율 비교 ····· 95

그림 목차

[그림 1.1] 전통한옥과 신한옥의 비교 ····· 2
[그림 1.2] 연구 흐름도 ····· 6
[그림 2.1] 신한옥 지붕의 개략적인 구성 및 각 부 명칭 ····· 11
[그림 2.2] 처마의 구성 ····· 11
[그림 2.3] 박공의 구성 ····· 11
[그림 2.4] 특수 제작된 당골막이용 단열재 ····· 13
[그림 2.5] 한옥 지붕의 여러 형태 ····· 13
[그림 2.6] 지붕의 열전달 현상에 대한 개략도 ····· 15
[그림 2.7] 일반적인 수치해석 알고리즘의 구성 ····· 23
[그림 2.8] 유한차분법 이용 시 경계조건에서 기울기 정의 문제 ····· 24
[그림 2.9] 유한체적법 적용 시 경계조건 기울기 정의 문제 해결 ····· 25
[그림 3.1] 신한옥 맞배지붕의 단면 예시 및 추가적 열손실 예상 부위 ····· 29
[그림 3.2] 당골막이 부위의 확대 단면 및 추가적 열손실 예상 부위 ····· 30
[그림 3.3] 박공벽 부위의 확대 단면 및 추가적 열손실 예상 부위 ····· 30
[그림 3.4] 지붕의 전열해석 시 부위 별 모델링 개념도 ····· 34
[그림 3.5] 신한옥 지붕의 전열해석 대상 모델의 지붕면 단면도 ····· 35
[그림 3.6] 신한옥 지붕의 전열해석 대상 모델의 박공벽 단면도 ····· 35
[그림 3.7] 신한옥 지붕의 전열해석 대상 지붕면 부위 모델 ····· 36
[그림 3.8] 신한옥 지붕의 전열해석 대상 박공벽 부위 모델 ····· 36
[그림 3.9] 신한옥 지붕면 부위 모델의 주요 위치에서의 격자 ····· 37
[그림 3.10] 신한옥 박공벽 부위 모델의 주요 위치에서의 격자 ····· 37
[그림 3.11] 전통한옥 지붕의 전열해석 대상 지붕면 부위 모델 ····· 39
[그림 3.12] 전통한옥 지붕의 전열해석 대상 박공벽 부위 모델 ····· 39
[그림 3.13] 현대 주택 지붕의 주요 부위 단면 상세도 ····· 40
[그림 3.14] 현대 주택 지붕의 전열해석 대상 지붕면 부위 모델 ····· 41

[그림 3.15] 현대 주택 지붕의 전열해석 대상 박공벽 부위 모델 ····· 41
[그림 3.16] 현대 주택 지붕 모델의 주요 위치에서의 격자 ····· 41
[그림 3.17] 패시브하우스 지붕과 벽체의 접합부 단면 ····· 43
[그림 3.18] 패시브하우스 지붕의 전열해석 대상 지붕면 부위 모델 ····· 44
[그림 3.19] 패시브하우스 지붕의 전열해석 대상 박공벽 부위 모델 ····· 45
[그림 3.20] 패시브하우스 모델의 주요 위치에서의 격자 ····· 45
[그림 3.21] 신한옥 지붕면 부위 모델 해석 결과 각부 온도 분포 ····· 46
[그림 3.22] 신한옥 지붕면 부위 모델 해석 결과 각부 열유속 분포 ····· 47
[그림 3.23] 신한옥 박공벽 부위 모델 해석 결과 각부 온도 분포 ····· 48
[그림 3.24] 신한옥 박공벽 부위 모델 해석 결과 각부 열유속 분포 ····· 49
[그림 3.25] 전통한옥 지붕면 부위 모델 해석 결과 각부 온도 분포 ····· 50
[그림 3.26] 전통한옥 지붕면 부위 모델 해석 결과 각부 열유속 분포 ····· 50
[그림 3.27] 전통한옥 박공벽 부위 모델 해석 결과 각부 온도 분포 ····· 51
[그림 3.28] 전통한옥 박공벽 부위 모델 해석 결과 각부 열유속 분포 ····· 52
[그림 3.29] 현대 주택 지붕면 부위 모델 해석 결과 전체적인 온도 분포 ····· 53
[그림 3.30] 현대 주택 지붕면 부위 모델 해석 결과 각부 열유속 분포 ····· 53
[그림 3.31] 현대 주택 박공벽 부위 모델 해석 결과 각부 온도 분포 ····· 54
[그림 3.32] 현대 주택 박공벽 부위 모델 해석 결과 각부 열유속 분포 ····· 54
[그림 3.33] 패시브하우스 지붕면 부위 모델 해석 결과 각부 온도 분포 ····· 55
[그림 3.34] 패시브하우스 지붕면 부위 모델 해석 결과 각부 열유속 분포 ····· 56
[그림 3.35] 패시브하우스 박공벽 부위 모델 해석 결과 각부 온도 분포 ····· 57
[그림 3.36] 패시브하우스 박공벽 부위 모델 해석 결과 각부 열유속 분포 ····· 57
[그림 3.37] 표면온도 및 열유속 측정 방법 ····· 60
[그림 3.38] 지붕면 부위의 표면온도 측정 결과 ····· 60
[그림 3.39] 당골막이 부위의 표면온도 측정 결과 ····· 61
[그림 3.40] 박공벽 부위의 표면온도 측정 결과 ····· 61
[그림 4.1] 지붕의 평균 열관류율 계산 방법 ····· 69

[그림 4.2] 신한옥 지붕의 지붕면 상부에서 발생하는 열유속 분포 ····· 77
[그림 4.3] 신한옥 지붕의 지붕면 중심부에서 발생하는 열유속 분포 ····· 78
[그림 4.4] 신한옥 지붕의 당골막이 부위에서 발생하는 열유속 분포 ····· 79
[그림 4.5] 신한옥 지붕의 지붕면-박공벽 접합 부위에서 발생하는 열유속 분포 ·· 81
[그림 4.6] 신한옥 지붕의 박공벽 부위에서 발생하는 열유속 분포 ····· 82
[그림 4.7] 신한옥 지붕 상부에서의 단열 개선 방안 ····· 84
[그림 4.8] 신한옥 지붕 상부의 서까래 시공 방법 실제 사례 ····· 85
[그림 4.9] 신한옥 지붕의 지붕-벽체 접합부의 단열 개선 방안 ····· 86
[그림 4.10] 캔틸레버 부위의 열교 방지를 위한 단열재 시제품 사례 ····· 86
[그림 4.11] 신한옥 지붕의 당골막이 부위의 단열 개선 방안 ····· 87
[그림 4.12] 신한옥 지붕의 도리 부위의 단열 개선 방안 ····· 88
[그림 4.13] 신한옥 지붕의 박공벽 부위의 단열 개선 방안 ····· 89
[그림 4.14] 열 성능 개선 신한옥의 지붕면 부위 모델 해석 결과 온도 분포 ····· 90
[그림 4.15] 열 성능 개선 신한옥의 지붕면 부위 모델 해석 결과 열유속 분포 ··· 90
[그림 4.16] 열 성능 개선 신한옥의 박공벽 부위 모델 해석 결과 온도 분포 ····· 93
[그림 4.17] 열 성능 개선 신한옥의 박공벽 부위 모델 해석 결과 열유속 분포 ··· 93

제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

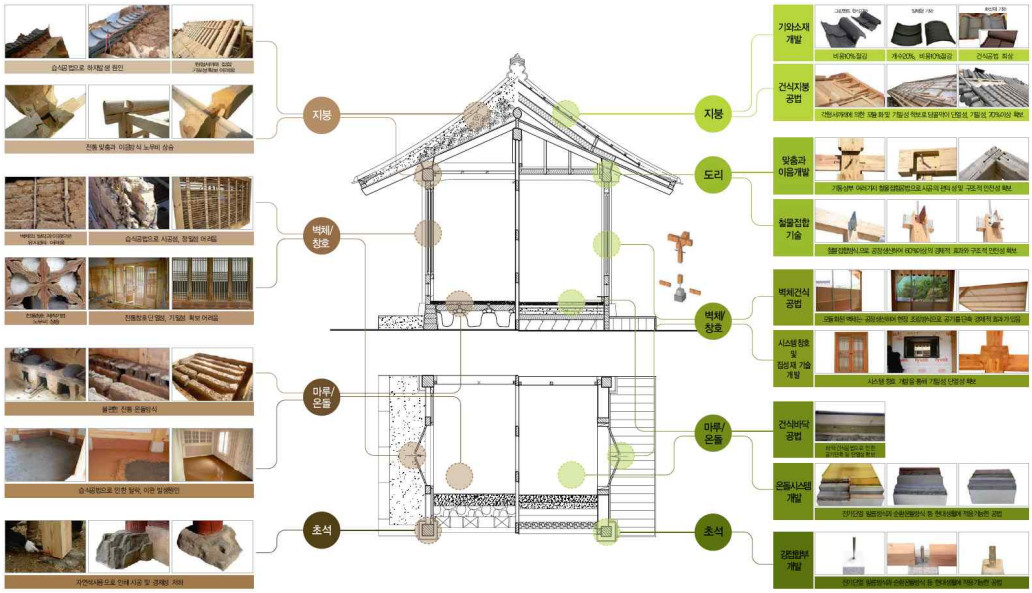
최근 독창적, 친환경적인 주거 형태에 대한 요구에 따라 우리 고유의 구조와 멋을 갖춘 한옥에 대한 관심이 증대되고 있다. 이와 더불어 북촌과 전주의 한옥마을 등 지자체의 한옥 지원 사업이 성공하면서 한옥에 대한 인식 또한 긍정적으로 변화하고 있다. 그러나 전통한옥은 시공비가 높은 반면, 낮은 단열 수준, 유지 관리의 어려움으로 인해 현대 주택에 비해 거주 만족도가 떨어진다.[1] 이러한 단점을 극복하고자, 전통한옥의 구조와 디자인은 그대로 유지한 채, 현대 기술을 적용한 신한옥에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 신한옥은 [그림 1.1]과 같이 설계, 시공 과정에서 부재의 규격화를 통해 단가와 공사기간을 크게 줄이고, 현대화된 재료를 사용하여 열 성능과 유지·보수의 용이성 등 건물의 거주 성능을 크게 향상시킨 것이 특징이다.

이처럼 가격과 기능 측면에서 경쟁력을 확보한 신한옥은 '열 성능 향상'이라는 키워드로 다양한 주체에 의해 보급되고 있다. 하지만 접합부재와 단면의 형상이 복잡한 신한옥 지붕에 대해, 단열재 시공 여부 외에 열 성능에 대한 정량적인 값이 제시되지 않거나, 단순한 계산법에 의한 근삿값만이 제시되는 경우가 대부분이다. 특히 단열재가 시공되지 않는 부재의 접합 부위에서 의도치 않은 열교가 발생하여 열 성능이 저하되었을 가능성이 있으므로[2] 신한옥의 지붕의 열 성능을 정량적 해석 없이 판단하는 것은 어려움이 따른다.

신한옥 지붕의 열 성능을 판단하기 위해서는 신한옥 지붕의 열 성능이 전통

---

1) 심경미, 서선영, 최근 한옥입주자 특성 및 한옥수요 조사 연구, 건축도시공간연구소, 2012, p.iv.
2) Tae-Gu Lim, et al., *Analysis of the Thermal Bridge Effect in the Roof of New Hanok*, Proceedings of the 10th International Symposium on Architectural Interchanges in Asia, 2014, pp.516-520.



[그림 1.1] 전통한옥과 신한옥의 비교 (전통한옥(좌), 신한옥(우))[3)]

한옥의 지붕과 비교하여 어느 정도 수준으로 강화되었으며, 한옥이 아닌 현대 주택, 그리고 열교가 거의 발생하지 않는 패시브하우스(Passive House)와 비교하였을 때 어느 정도 수준인지 파악할 필요가 있다. 이처럼 다른 형태의 주택 지붕과의 비교한 상대적인 열 성능을 파악하기 위해서는 열 성능을 평가할 수 있는 통일된 방법을 바탕으로 각각의 열 성능에 대한 정량적인 분석 결과가 뒷받침되어야 한다.

따라서 본 연구는 신한옥 지붕의 열전달 특성을 파악하여 신한옥 지붕의 열 성능을 정량적으로 분석하고, 이를 다른 형태의 주택과 비교 및 평가하는 것을 목표로 한다. 신한옥은 기본적으로 전통한옥의 디자인을 따르며, 현대 주택의 단열 수준을 표방하는 주택이기 때문에, 신한옥 지붕의 열 성능을 전통한옥, 현대 주택, 그리고 일반적으로 단열 수준이 가장 높은 것으로 평가되는

3) 한옥기술개발연구단, 미래주거문화 한옥이 대안이다, 한옥기술개발연구사업 리플릿, 국토교통부, 2013, p.2.

패시브하우스의 지붕과 비교하였다. 이와 더불어 신한옥 지붕에서 열 성능이 향상될 수 있는 지붕 구성 요소를 파악하여, 열 성능의 개선을 위한 단열 시공의 방향성을 제시하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

한옥의 지붕은 한옥의 디자인을 인식하게 하는 가장 중요한 요소인 동시에 지붕 상부로 부터의 하중을 안정적으로 기둥으로 전달하는 역할을 한다. 지붕 고유의 곡선을 표현하는 동시에 이를 지지하기 위한 다양한 크기의 구조 부재가 접합하면서 한옥의 지붕 내부는 단순한 면이 아닌 복잡한 입체의 형상을 지닌다. 신한옥 지붕 또한 마찬가지의 형상을 지니며, 이에 따른 열전달 특성 또한 3차원의 복잡한 특성을 갖는다. 따라서 본 연구는 현대 주택과 형상과 열전달 특성에서 확연한 차이를 보이는 신한옥의 지붕을 바탕으로 열 성능을 분석하고자 한다. 한옥의 지붕은 다양한 형태로 분류된다. 이 중 가장 기본적인 형태인 맞배지붕은 팔작지붕 다음으로 한옥에서 많이 이용되는 지붕 형태이다.[4] 본 연구는 신한옥 지붕의 형태에 따른 열 성능 차이를 분석하기보다는 주택의 형태에 따른 지붕의 열 성능을 비교하는데 목적을 두고 있는 기초적 단계의 연구이다. 따라서 가장 기본이 되고, 많은 신한옥에 적용되고 있는 맞배지붕을 중심으로 분석하고자 한다.

일반적으로 냉·난방 부하 또는 재실자의 쾌적에 가장 큰 영향을 미치는 두 가지 요소는 단열과 침기로 대응되는 열 성능과 기밀 성능이다. 거시적인 관점에서 이 둘은 서로에게 미치는 영향이 적으며, 지배하는 원리가 다르기 때문에 독립적인 것으로 판단할 수 있다. 본 연구에서는 이 중 열 성능만을 범위로 설정하였다. 특히 한옥은 더위보다 추위에 취약하기 때문에,

4) 이주옥, 한필원, 현대한옥 설계의 경향 연구, 한국건축역사학회 추계학술발표대회 논문집, 한국건축역사학회, 2010, p.144.

겨울철 극한 조건을 가정하여 열 성능을 판단하였다.

이에 따라 본 연구에서는 일반적인 열 성능 해석 방법을 바탕으로 신한옥과 전통한옥, 현대 주택 지붕의 열 성능을 비교하고, 신한옥의 열 성능을 심층적으로 분석하고자 한다. 다양한 형태를 갖는 지붕의 열 성능을 동일한 기준으로 비교하기 위해 전열해석 방법을 이용하였다. 연구에서 선정된 사례가 해당주택 유형을 완전하게 대표하지는 못한다는 한계점은 존재하지만, 연구의 결과를 바탕으로 신한옥 지붕의 단열 수준을 판단하는 정량적 근거가 마련될 것으로 예상된다. 또한 신한옥 지붕의 열손실 부위를 분석하여 최종적으로는 신한옥 지붕의 열 성능을 향상시킬 수 있는 상세를 결정할 수 있을 것이다.

이를 위한 연구의 순서는 먼저 신한옥 지붕의 구성 요소를 분석하고, 지붕의 열 성능 평가에 관한 선행연구와 수치해석 이론에 관한 예비적인 고찰 과정이 선행되었다. 다음으로 지붕 내에서의 열전달을 정성적으로 분석하고, 이를 반영한 전열해석을 통해 신한옥과 전통한옥, 현대 주택 및 패시브하우스 지붕의 열 성능을 정량적으로 비교하였다. 또한 분석 결과를 바탕으로 신한옥 지붕에서 추가적인 열손실이 발생하는 부위를 비교하여, 신한옥 지붕의 열 성능을 향상시키기 위한 개선 방향을 제시하였다. 이상에서 서술한 본 연구의 범위와 방법을 연구 진행 순서에 따라 정리하면 다음과 같다.

(1) 신한옥 지붕의 열 성능 평가를 위한 예비적 고찰

신한옥 지붕의 열 성능 해석을 위한 첫 단계로 전통한옥과 구분되는 신한옥의 정의와 범위를 파악하고, 전통한옥과 신한옥의 지붕은 어떠한 부재로 구성되어 있는지 분석하였다. 다음으로 한옥 지붕과 같이 열전달 특성이 복잡한 지붕에 대해 열 성능을 분석한 기존의 연구 문헌을 분석하여 신한옥

지붕에 응용할 수 있는 연구 사례를 고찰하였다. 마지막으로 전열해석 프로그램 선정을 위해 편미분 방정식의 수치해석 이론을 분석하여 전열해석의 원리와 프로그램 선정 시 고려사항을 분석하였다.

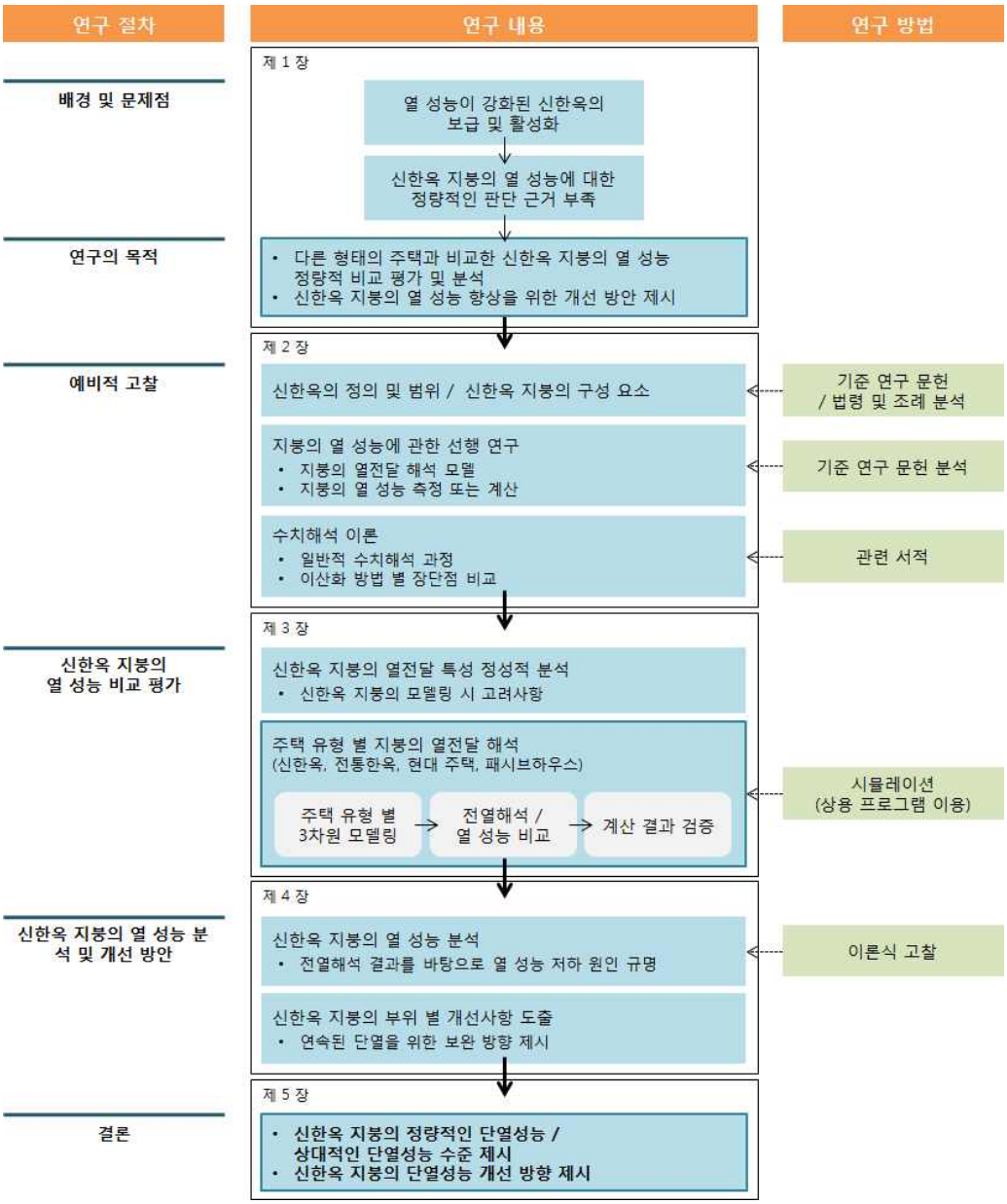
(2) 신한옥 지붕의 열 성능 비교 평가

신한옥 지붕의 열 성능을 평가하기 위하여 지붕의 구성 요소를 바탕으로 열전달 특성을 정성적으로 분석하였다. 분석 결과를 고려하여 신한옥의 지붕을 모델링하였고, 상대적인 비교를 위해 전통한옥, 현대주택 및 패시브하우스에 대한 모델을 추가하여 전열해석을 수행하였다. 신한옥 지붕의 해석 결과는 대상 신한옥 모델과 지붕 구성이 비슷한 신한옥 지붕에 대해 표면 온도와 열유속을 비교하여 검증하였다. 열 성능 계산 결과를 종합하여 신한옥 지붕의 열 성능은 어느 정도 수준인지 파악하고, 다른 형태의 주택과 비교한 차이는 무엇인지, 그 원인을 종합적으로 분석하였다.

(3) 신한옥 지붕의 열 성능 분석 및 개선 방안

신한옥은 거주 성능을 향상하고자하는 뚜렷한 목적이 있는 주택 형태이기 때문에 열 성능 또한 현대 주택 또는 그 이상의 수준에 도달해야한다. 그러나 한옥의 지붕은 독특한 접합 형상 또는 부재의 관통 등의 이유로 완전하게 연속되는 단열 시공이 어렵다. 이러한 단점을 극복할 수 있도록 다른 형태의 주택과 비교한 열전달 특성을 바탕으로 신한옥 지붕에서 열 성능이 개선될 수 있는 방향을 제시하였다.

이상에서 서술한 본 연구의 범위 및 방법에 의한 연구 진행은 다음 [그림 1.2]의 연구 흐름도와 같다.


연구 절차
연구 내용
연구 방법
배경 및 문제점
연구의 목적
예비적 고찰
신한옥 지붕의 열 성능 비교 평가
신한옥 지붕의 열 성능 분석 및 개선 방안
결론
제 1 장
열 성능이 강화된 신한옥의 보급 및 활성화
신한옥 지붕의 열 성능에 대한 정량적인 판단 근거 부족
• 다른 형태의 주택과 비교한 신한옥 지붕의 열 성능 정량적 비교 평가 및 분석
• 신한옥 지붕의 열 성능 향상을 위한 개선 방안 제시
제 2 장
신한옥의 정의 및 범위 / 신한옥 지붕의 구성 요소
지붕의 열 성능에 관한 선행 연구
• 지붕의 열전달 해석 모델
• 지붕의 열 성능 측정 또는 계산
수치해석 이론
• 일반적 수치해석 과정
• 이산화 방법 별 장단점 비교
기준 연구 문헌 / 법령 및 조례 분석
기준 연구 문헌 분석
관련 서적
제 3 장
신한옥 지붕의 열전달 특성 정성적 분석
• 신한옥 지붕의 모델링 시 고려사항
주택 유형 별 지붕의 열전달 해석
(신한옥, 전통한옥, 현대 주택, 패시브하우스)
주택 유형 별 3차원 모델링
전열해석 / 열 성능 비교
계산 결과 검증
시뮬레이션 (상용 프로그램 이용)
제 4 장
신한옥 지붕의 열 성능 분석
• 전열해석 결과를 바탕으로 열 성능 저하 원인 규명
신한옥 지붕의 부위 별 개선사항 도출
• 연속된 단열을 위한 보완 방향 제시
이론식 고찰
제 5 장
• 신한옥 지붕의 정량적인 단열성능 / 상대적인 단열성능 수준 제시
• 신한옥 지붕의 단열성능 개선 방향 제시

[그림 1.2] 연구 흐름도

제 2 장 신한옥 지붕의 열 성능 평가를 위한 예비적 고찰

2.1 개요

신한옥 지붕에 관한 열전달을 해석하기 위해서는 신한옥 지붕의 구성 요소를 명확히 이해하고, 열전달 해석 원리에 따른 합리적인 해석 방법을 계획해야 한다. 이를 위한 예비적 고찰을 위해 전통한옥과 구분되는 신한옥의 정의와 한옥 지붕의 구성 요소를 정리한 뒤, 관련 분야에서 지붕의 열 성능이 어떻게 평가되는지에 관한 선행연구와 열전달 해석의 배경 이론을 파악하고자 한다.

2.2 신한옥 정의 및 신한옥 지붕의 구성 요소

신한옥에 대한 정의는 각 연구자마다 약간의 차이를 보이지만 비슷한 맥락을 보이며, 법령 및 지자체 조례에서는 신한옥을 전통한옥과 구분지어 정의하고 있지는 않다. 신한옥의 지붕은 도리 상부로부터 기와까지의 요소 전체를 포함하며, 신기술이 적용된 신한옥은 지붕 내부의 구성요소에 있어 차이를 보인다. 신한옥에서는 대부분 전통한옥의 명칭이나 용어를 그대로 사용하지만 경우에 따라 용어가 추가 또는 삭제되기도 한다.

2.2.1. 신한옥의 정의와 범위

가. 기존 연구에 따른 신한옥의 정의

신한옥은 앞서 언급한 바와 같이 현대적 기술이 적용된 한옥의 개념이다. 한옥의 구성 부재는 규격화되어 기계화 가공이 가능해졌고, 공사 단가와 기간에 대한 표준화된 데이터가 구축되었다. 흙이나 볏짚 등의 전통재료는 열 성능, 기밀성능이 향상된 현대적 재료로 대체되었고, 이에 따른 건식 시공으로

공시 기간 또한 단축되었다. 재료의 내구성 또한 향상되어 유지·보수에 필요한 비용과 노력 또한 저감되었다. 이렇게 신기술이 적용된 신한옥은 시공 과정, 구성 요소, 거주 성능 등의 측면에서 전통한옥과는 큰 차이를 보이며, 전통한옥과 구분되는 별도의 정의가 필요하다.

이에 대한 기존의 학술적 정의는 <표 2.1>과 같이 요약할 수 있다. 공통적으로 한옥의 전통 가치인 전통 목구조와 외관을 유지하되, 성능 향상을 위해

<표 2.1> 기존 연구보고서 내 신한옥의 정의 현황[5)]

연구보고서	신한옥의 정의에 관한 내용
한옥건축 산업화를 위한 기반구축연구 1. 한옥건축 진흥을 위한 제도기반 구축 연구 (국토해양부, 2008)	"신한옥"이라함은 주요구조부가 한국 고유의 목구조 방식으로 건축된 건축물로서, 건축성능을 향상시키기 위하여 현대적 기술 및 재료를 사용한 건축물 및 그 부속시설을 말한다.
한옥건축 산업화를 위한 기반구축연구 2. 한옥건축 산업화 촉진을 위한 기술기반 구축기획 연구 (국토해양부, 2008)	신한옥 - 한국의 고유한 목구조 방식 유지 - 한옥의 가치 유지 - 선진시스템을 통한 건축성능(재료, 기술 등)의 향상 도모
한옥건축 기술기준 등 연구1 (국토해양부, 2009)	한옥의 보급과 육성을 위한 정의 - 한국 전통적인 목구조 방식과 외관을 기본으로 하되, 복합적인 구조방식과 혁신적인 시공방식, 성능 향상된 재료 등으로 구축된 건물
신한옥마을 시범사업 시행방향 및 기준마련을 위한 연구 (LH, 2009)	신한옥은 한옥의 전통가치와 더불어 선진화된 목조건축기술 및 시스템을 도입하여 현대적 생활과 환경에 적응하도록 개선한 것을 의미
한옥건축 활성화 추진방안 (국토해양부, 2010)	한옥의 '상' 정립 - 건축법 시행령에 규정된 지원기준으로서 한옥의 정의를 포함하여 미래 한국의 일상적 주거문화를 선도하며, 역사·문화·환경적으로 지속가능한 주거공간으로 그 개념이 확장되어야 함
한옥 활성화 실천방안 연구 (국토해양부, 2010)	신한옥이란 한국 전통적인 목구조 방식과 외관을 기본으로 하되, 복합적인 구조방식과 혁신적인 시공방식, 성능 향상된 재료 등으로 구축된 건물을 의미하며, 미래 한국의 일상적 주거문화로서 역사·문화·환경적으로 지속가능한 주거공간이 되어야 함

5) 건축도시공간연구소 외, 한옥 활성화 실천방안 연구, 국토해양부, 2010, pp.20-21.

신기술 또는 재료를 적용한 건물이라 정의할 수 있다. 한옥으로서의 이미지를 결정하는 중요한 특성인 전통 목구조와 외관은 최소한의 조건으로 정의한 것, 거주 성능 향상을 목적으로 한다는 점이 중요한 특징이다. 이러한 정의 외에도 정영수(2012)는 '기본적으로 우리나라 전통 한옥의 양식을 계승하면서 동시에 건설비 저감을 통한 대중화를 확보하고 현대생활에 적합한 거주 성능을 갖춘 현대화된 한옥'이라 정의하며 가격 경쟁력을 강조하였다. 전봉희(2013)는 기존 신한옥의 정의에 '전통 한옥을 토대로 미래지향적인 한국주거문화에 대한 고민이 반영된'이라는 추상적 개념을 추가하여 신한옥을 정의하였다.

나. 법령 및 조례에 따른 신한옥의 범위

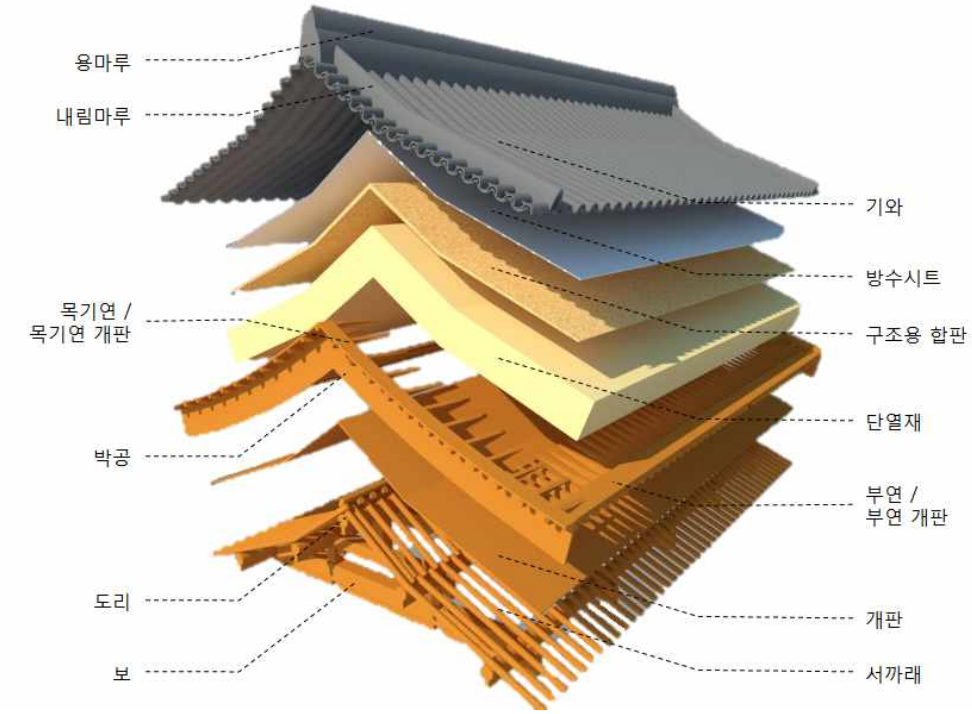
현재 대부분의 한옥 관련 법령이나 지자체 조례에서는 전통한옥과 신한옥을 구분하지 않고, 주로 한옥이라는 통일된 용어를 사용한다. 다만, <표 2.2>와 같이 한옥을 정의함에 있어 필수 요소만을 정의하여 한옥의 범위를 신한옥까지 확장할 수 있는 가능성을 열어둔 경우가 많다. 지붕틀과 자연재료의 사용까지 규정하는 건축법 시행령 등 일부 보수적인 법령과 조례를 제외하면, 대부분의 법령과 조례에서는 전통한옥이 갖는 최소한의 특성인 전통 목구조와 한식 기와만을 요구하므로 신한옥을 한옥의 일부로 인정하는 것으로 볼 수 있다. 이외에도 최근 신한옥 관련 정책 및 사업을 위해 신한옥을 한옥과 제도적으로 구분하고자 하는 요구를 반영한 법도 등장하였다. 한옥 등 건축자산의 진흥에 관한 법률에서는 신한옥에 대응되는 개념이자 "한옥"과는 구분되는 개념으로 "한옥건축양식"이라는 용어를 도입하여 '한옥의 형태와 구조를 갖추거나 또는 이를 현대적인 재료와 기술을 사용하여 건축한 것'으로 정의하였다. 이렇듯 한옥 관련 법령에서 아직 신한옥의 용어를 따로 정의하고 있지는 않지만 대부분 한옥을 정의할 때 그 최소 조건만을 명시하여 신한옥의 보급을 위한 가능성을 열어둔 것으로 판단할 수 있다.

<표 2.2> 관련 법 및 지자체 조례별 한옥 정의

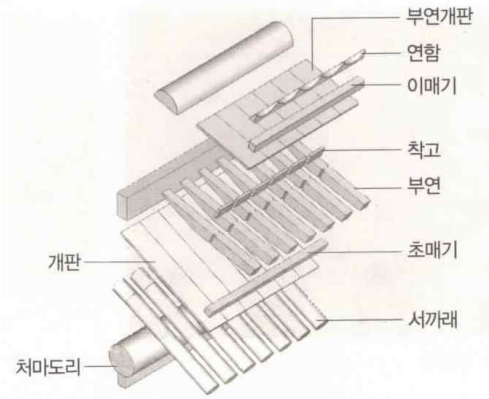
구분	구조 방식	지붕	기와	마감재료	기타
건축법 시행령, 완주군, 충남, 전주시, 거제시	목구조 (기둥 및 보)	한식 지붕틀	한식기와	볏짚, 목재, 흙 등 자연재료	전통양식 반영
부산(기장군)	목구조	한식 지붕틀	한식기와	볏짚, 목재, 흙 등 자연재료	전통건축 양식
장성군, 영암군, 고흥군	목재 기둥	목재 지붕틀	한식기와	흙, 황토벽돌 등 친환경자재	-
무안군	목재 기둥	목재 지붕틀	한식기와	-	-
안동시	목구조	한식 지붕	-	-	전통건축 양식
함평군, 충주시, 담양군,	목구조	-	한식기와	흙, 황토벽돌(블록) 등 친환경자재	-
관광진흥법 시행령, 수원시, 진도군, 강진군, 대구, 광주, 서울, 청주시	목구조	-	한식기와	-	전통미 간직
광양시, 영광군, 강원도, 전남, 하동군, 단양군, 목포시, 창녕군, 나주시, 구례군, 장흥군, 경남, 해남군, 신안군, 곡성군, 순천시, 완도군, 화순군	목구조	-	한식기와	-	-
여수시	목구조	-	기와	-	-

2.2.2. 신한옥 지붕의 구성 요소

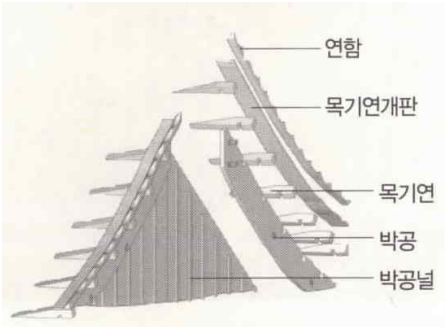
신한옥의 지붕을 구성 요소에 따라 구분하고, 단순화하여 나타내면 [그림 2.1]과 같다. 5량가의 맞배지붕 형태의 신한옥 지붕을 나타내었으며, 지붕은 그림과 같이 서까래를 포함한 서까래 상부의 부재로 이루어진다. 가장 기본적인 구조 부재인 서까래는 구조 부재인 도리 바로 위에 위치하면서, 상부의 하중을 지지하는 동시에 지붕의 기울기와 처마의 내밀기, 지붕의 3차원 곡선을 결정하여 실내·외에서 전통적



[그림 2.1] 신한옥 지붕의 개략적인 구성 및 각 부 명칭



[그림 2.2] 처마의 구성[6)]



[그림 2.3] 박공의 구성[7)]

인 이미지를 제공하는 중요한 부재이다. 서까래 상부로는 면 부재 시공을 위한 판재인 개판이 시공된다. 전통한옥에서는 개판 상부에 흙과 볏짚 등 자연재료를 시공

6) 김왕직, 『알기쉬운 한국건축 용어사전』, 동녘, 2013, p.177.
7) Ibid, p.176.

한 뒤 전통 토기와를 얹어 시공하였으나, 신한옥에서는 단열재, 지붕틀, 구조용 합판, 방수시트, 개량기와 등이 건물의 요구 성능에 맞게 시공되는 것이 일반적이다. 신한옥에서도 전통 목구조와 기와의 마감형태 등은 전통한옥과 거의 동일하게 유지되기 때문에 이와 관련한 용어 또한 전통한옥에서 사용되는 용어가 그대로 유지된다.

서까래가 기둥 밖으로 빠져나온 부분은 처마, 맞배지붕의 측면에서 발생하는 삼각형 부분을 만들기 위한 판재를 박공[8]이라 한다. 강우나 강설로부터 건물 외벽을 보호하고, 일사를 차단하기 위해 처마와 박공은 건물의 외벽보다 돌출되어 있는 것이 일반적이다. 처마와 박공의 마무리를 위해서는 각각 부연 및 목기연이 이용된다. 각각에 대한 상세는 [그림 2.2]와 [그림 2.3]에 자세히 표현되어 있으며, 이는 시공되는 한옥에 따라 생략되거나 형태의 차이를 보일 수 있다.

서까래가 놓이는 도리 윗부분의 서까래 사이 공간은 트여있는데, 이 부분을 당골막이라고 한다.[9] 건물 밖으로 노출되는 부위의 서까래는 주로 원형이기 때문에 판재로는 이 부분을 마감하기 어려워 흙으로 막거나 [그림 2.4]와 같이 특별히 제작된 단열재 제품으로 막고 마감한다. 도리와 당골막이는 상부에 위치한 벽체로도 볼 수 있으나, 서까래를 바치거나 감싸고 있는 부재이기 때문에 본 연구에서는 지붕부재로 포함하도록 한다.

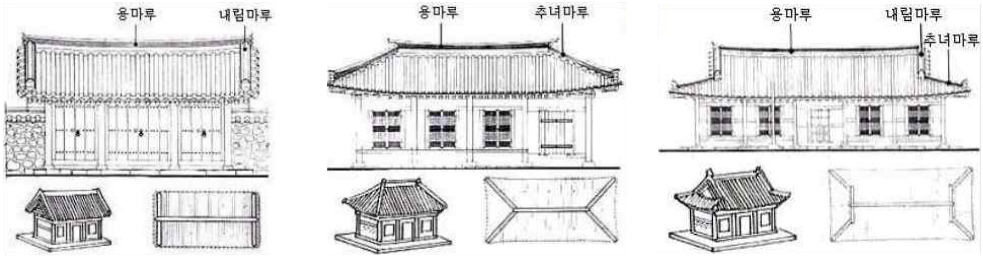
지붕의 가장 바깥으로는 기와가 시공되는데, 전통적인 방식으로는 암키와와 수키와가 번갈아가며 시공되어 고유의 이미지를 만들어낸다. 처마 끝에는 마감을 위해 막새기와가 시공되기도 하며, 박공 상부에도 너새기와가 사용되는 것이 일반적이다. 전통 기와는 낱장으로 시공되지만, 최근에 개발된 PVC기와, 금속기와 등 개량기와는 시공성 향상을 위해 몇 개의 기와가 하나의 모듈로 제작된 경우도 있다. 지붕면의 상단 모서리를 따라 용마루가, 박공 상부를 따라 내림마루가 시공되어 지붕의 형태를 완성한다.

---

8) 김왕직, op. cit., p.174.
9) Ibid, p.174.

[그림 2.4] 특수 제작된 당골막이용 단열재[10)]

신한옥에서 주로 사용되는 지붕의 형태는 정자나 탑에 사용되는 모임지붕을 제외하면, [그림 2.5]와 같이 맞배지붕, 우진각지붕, 팔작지붕으로 구분된다. 가장 간단한 형태인 맞배지붕은 건물 앞뒤에서만 지붕면이 보이고 용마루와 내림마루로만 구성된 지붕이다.[11)] 우진각지붕은 네 면에 모두 지붕면이 있고 용마루와 추녀마루로 구성된 지붕이다. 전후 지붕면은 사다리꼴이고, 양측 지붕면은 삼각형이다.[12)] 팔작지붕은 우진각지붕 위에 맞배지붕을 올려놓은 것과 같은 모습의 지붕으로[13)], 현재 가장 많이 이용되는 형태이다.



(a) 맞배지붕 (b) 우진각지붕 (c) 팔작지붕

[그림 2.5] 한옥 지붕의 여러 형태[14)]

10) http://www.alc-dooson.co.kr/ (두손ALC건설 시공사례)
11) 김왕직, op. cit.,, p.184.
12) Ibid, p.185.
13) Ibid, p.186.
14) http://www.gijangnews.com/news/articleView.html?idxno=6388 ([최동군의 나도 문화해설사] 동궐도 분석 - 돈화문 주변1)

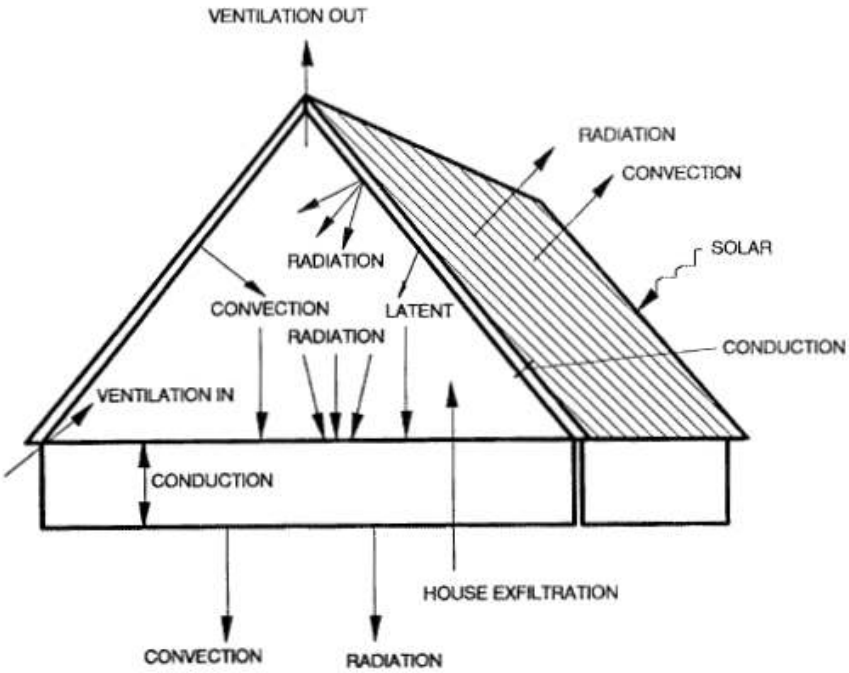
2.3 지붕의 열 성능에 관한 선행 연구

지붕의 열 성능에 대한 연구는 냉·난방부하 계산, 단열재 적용 효과, 열교 및 결로 판별 또는 방지 등의 여러 목적으로 수행되어왔다. 이와 관련하여 다양한 연구가 존재하지만, 크게 지붕을 통한 열전달을 간단하게 묘사하기 위한 열전달 해석 모델 연구와 지붕의 열전달을 상세하게 분석하기 위한 측정 및 계산에 관한 연구로 나눌 수 있다. 전자의 경우 주로 부하계산 시 지붕을 통한 열전달을 고려하기 위한 연구가 많고, 후자의 경우 단열재 적용 효과 분석 또는 열교 및 결로 방지 등에 대한 연구가 주를 이루고 있다.

2.3.1. 지붕의 열전달 해석 모델에 관한 연구

건물의 지붕에서는 [그림 2.6]과 같이 다양한 형태의 열전달이 발생한다. 기본적으로 반자 또는 지붕면을 통한 전도 열전달이 발생하며, 실내 또는 실외 표면, 다락 공간에서는 대류와 복사를 통한 열전달이 발생한다. 또한 지붕의 틈새 또는 개구부를 통한 침기 및 환기로도 열이 출입하고, 지붕 부재의 축열 효과에 따라 열의 이동은 시간 지연이 발생하기도 한다. 이와 같이 지붕에서 발생할 수 있는 다양한 열전달은 지붕의 열전달 해석 시 고려되어야 하지만, 효율적인 해석을 위해 합리적인 가정에 의해 생략되거나 간단화될 수 있다. 지붕에서 발생하는 열전달 현상을 파악하고 각각이 전체 열전달에 미치는 영향을 고려하기 위하여 지붕의 열전달을 간단하게 묘사한 해석 모델에 관한 연구를 분석하였다.

지붕의 열전달 해석 모델과 관련한 연구는 목조 주택이 보급된 서양을 중심으로 비교적 오랜 기간 수행되어왔다. Parker(2005)는 자신의 논문에서 당시까지 개발된 지붕의 열전달 해석 모델을 정리하였다. Parker의 내용을 바탕으로 지붕의 열전달 해석 모델 제작 시 일반적으로 반영하는 열전도 및 대류



[그림 2.6] 지붕의 열전달 현상에 대한 개략도[15)]

열전달, 침기 및 환기 외에 추가로 고려할 수 있는 사항을 9가지로 정리하면, <표 2.3>과 같다. 고려사항에 따라 지금까지 개발된 모델을 특징 별로 요약하면 <표 2.4>와 같이 정리할 수 있다.

정상상태 모델을 먼저 살펴보면, Joy(1958)의 모델은 지붕의 열전달 해석을 위한 최초의 모델로, 다락 내 공기층 온도에 대한 3개의 미지 온도를 각각의 3개의 연립방정식으로 계산하였다. 박공벽에 대한 언급은 없었으며, 열전달은 정상상태로 가정하였고, 지붕 내의 공기는 지붕면 하부, 중앙부, 반자 상부의 3개의 층으로 성층화되는 것을 가정하였다. ASHRAE(1980)는 부하계산을 위해 완전 혼합을 가정한 다락 내 공기의 온도를 계산할 수 있도록 단순화한 모델을 제시하고, 공기 온도 계산식을 제공하였다. Fairey(1988)는 평지붕 내의

15) Wilkes, K. E., *Thermal Model of Attic Systems with Radiant Barriers*, ORNL/CON-262, Oak Ridge National Laboratory, 1991, p.6.

<표 2.3> 지붕의 열전달 해석 모델 제작 시 추가적 고려사항

번호	고려사항	설명
1	비정상상태 해석	시간에 따라 변화하는 열전달 고려
2	다락 내 공기의 온도분포	다락 내 공기가 온도에 따라 성층화되는 것을 고려
3	지붕면의 축열 효과	지붕면 부재의 열용량에 의한 축열
4	반자의 축열 효과	반자의 열용량에 의한 축열
5	다락 내 공기의 축열 효과	다락 내 공기의 열용량에 의한 축열
6	복사 열 교환	지붕면 내·외부 등 면과 면 사이의 복사 열 교환
7	대류 열전달계수 변화	온도 또는 바람에 의한 대류 열전달계수 변화
8	박공벽 열전달	건물의 측면의 삼각형 벽을 통한 열전달 고려
9	습기 이동	틈새 또는 개구부를 통한 잠열 출입 고려

<표 2.4> 현재까지 개발된 지붕의 열전달 해석 모델과 각각의 고려사항

고려사항 / 문헌	1	2	3	4	5	6	7	8	9	중점사항
Joy(1958)		O				O				
Fairey(1988)		O				O	O			공기 성층화
ASHRAE(1980)								O		다락 내 온도
TenWolde(1997)						O	O		O	습기 부하
Kusuda(1981)	O		O					O		
Blancett(1979)	O		O		O			O		
Peavy(1979)	O	O	O			O	O			환기부하
Wikes(1991)	O	O	O	O		O	O		O	복사 열 교환
FSEC(1999)	O	O			O	O	O	O	O	덕트 열전달 / 건물 전체 부하
Parker(2005)	O	O			O	O	O	O	O	덕트 열전달 / 건물 전체 부하
New(2011)	O	O	O		O	O	O	O	O	경제성 평가

다락공간에 대한 정상상태 해석 모델을 공기의 성층화에 초점을 맞추어 제시하였다. 다락 내 6개의 온도에 대해 6개의 연립방정식을 세워 간단하게 풀어내었으며, 태양에 의한 단파 복사는 상당외기온으로 대체하였다. TenWolde (1997)는 지붕 내의 습기 이동에 따른 상대습도 계산을 중점적으로 반영하여,

열평형 및 습기 평형 방정식이 수렴하도록 하는 계산 모델을 제시하였다. 이들 계산 모델은 모두 정상상태 계산에 근거한 모델로, 비교적 합리적인 가정에 따라 각 연구자가 목적으로 하는 특징이 반영되었다.

비정상상태 해석을 위한 시도는 Blancett(1979)와 Kusuda(1981)의 모델에서 반영되었다. 이들 모델은 지붕면의 축열 효과를 고려한 열적 네트워크(Thermal Network) 모델을 제시하였으며, Kusuda(1981)는 지붕면을 통한 열전달에 전달함수 개념을 도입하여 전도 시 시간지연효과를 반영하였다. 두 모델 모두 지붕 내부에서의 복사 열 교환에 대한 고려는 부족하였다. 한편, Peavy(1979)와 Wilkes(1991)은 지붕에서 이전 무한 시간의 기온 변화에 따른 현재의 열류량 변화를 계산하고자 가중계수법(Weighting factor method)을 이용하였다. Peavy는 박공벽을 통한 열전달은 무시하고, 표면에 대한 4개의 식, 공기에 대한 1개의 식으로 미지의 5가지 온도를 계산하도록 하였다. 높은 정확도의 다락 모델이 제시되어 Peavy의 모델은 이후 개발되는 모델의 기본이 되었다. 비슷한 방법으로, Wilkes는 이를 발전시켜 박공벽, 처마 등에 의한 전도와 대류, 복사 열전달, 환기 및 습기 이동까지 수학적으로 기술한 모델을 제시하였다. Peavy가 태양 복사를 상당외기온으로 대체한 반면, Wilkes는 외부 표면의 태양 복사열을 고려하였고, 다양한 환기 패턴까지 고려하였다. Wilkes의 모델은 지붕 내 열전달 해석 프로그램인 AtticSim의 기본이 되었다.

FSEC(1999)는 앞선 모델보다는 전체 건물의 열전달 해석이라는 측면에서 접근한 모델을 개발하였다. 열전달 모델을 건물의 에너지해석 프로그램인 DOE-2.1에 탑재하여, 지붕 내의 공간과 인접한 실의 관계를 규명하는데 유리하도록 하였다. 다락 내의 복사 열 교환이나 부재의 축열 효과 등에 대한 충분한 묘사는 이루어지지 않았지만, 덕트를 통한 열손실 및 누기 등을 고려하는 점에서 기존 모델과 차별화가 이루어졌다. Parker(2005)는 자신이 만든

FSEC의 모델에 다락 공간 내 대류 및 복사 열 교환을 보완한 수정된 모델을 제시하였다. New(2011)는 Wilkes의 모델과 Parker의 모델의 장점을 통합한 계산 모델을 제시하였다. Wilkes의 모델이 다락 내 각 부분의 온도, 열전달을 정확히 계산하는데 유리하고, DOE는 인접 실과의 관계, 덕트 등에 대한 계산에 유리하므로, 각 모델이 서로 정보를 주고받으며 해석이 가능하도록 하였다. 이를 이용하여 지붕 시스템에 새로운 기술을 적용했을 때 예상되는 경제적 이득을 계산하는 목적의 프로그램을 개발하였다.

앞서 언급된 열전달 해석 모델은 대부분 지붕면의 형상이 평면적이고, 다락 공간의 크기가 커 대류 및 복사 열전달이 활발한 지붕에서 비교적 높은 정확도를 보이며 사용된다. 지붕면이나 반자 등 면 부재의 열전달은 1차원적인 열전달로 가정하였고, 부하 계산 시 지붕의 열전달을 보다 정확하게 반영하기 위한 목적으로 하는 연구가 많았다. 대부분 모델은 간단한 열적 네트워크 또는 열평형 방정식으로 구성되어 있으므로 비정상해석에도 쉽게 적용된다는 장점이 있다. 하지만 신한옥과 같이 2차원 또는 3차원 열전달 발생 부위가 많아 전도에 관한 보다 정밀한 계산이 요구되며, 앞서 제시된 열전달 현상을 고려하되, 내부 중공층이 없거나 크기가 협소한 신한옥 지붕에 대해서는 합리적인 가정을 바탕으로 모델이 수정될 필요가 있다.

2.3.2. 지붕의 열 성능 정밀 평가에 관한 연구

지붕의 열관류율 또는 열교 등을 평가하기 위한 연구 방법으로 주로 실험적인 방법과 수치적인 방법이 활용되고 있다. 실험적인 방법은 확인하고자 하는 물리 현상을 가장 사실적으로 묘사할 수 있다는 장점이 있지만, 실험 또는 실측 장치 설치에 비용과 시간이 많이 소요되며, 물리적 조건 변화가 쉽지 않다는 단점이 있다. 이와 반대로 수치적인 방법은 지배 방정식이 존재하는 복잡한

물리 현상을 다양한 상황을 가정하여 비교적 저렴한 비용과 적은 시간으로 계산할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 미분식의 이산화 과정에서 발생하는 오차와 입력 변수의 부정확성에 따라 정밀한 해를 구하지 못하는 단점이 있다.

가. 실측을 통한 열 성능 평가

실험적인 방법은 실험실에서 열상자 등을 구성하여 열관류율을 측정하는 방법과 외부에 실험용 챔버를 구축하여 열류계 또는 적외선 카메라를 이용하여 측정하는 방법이 있다. 이와 관련한 기술적인 방법은 Flanders(1994)에 자세히 서술되어 있다. Flanders는 건물 외피의 열류를 측정하는 방법으로 열류량계, 적외선 카메라, 온도계 등을 이용하여 현장 또는 실험실에서 측정하는 방법을 제시하고, 이중 열류량계를 중점적으로 서술하였다. 이를 응용하여, Michels(2008)은 반사형 단열재를 적용한 지붕에 대해 열저항을 측정하기 위해 열류량계를 이용한 소형 열상자를 제작하여 실험에 이용하였다. 이를 통해 열류량계를 이용한 간단한 장치로도 유의미한 실험이 가능함을 보였다.

최근에는 열류량계 외에도 적외선 촬영법을 이용한 열관류율 평가 방법이 활발하게 제시되고 있다. Albatici(2010)는 적외선 촬영법을 이용하여 빠르게 건물 외피의 열관류율을 측정하는 방법을 제시하였다. 이를 위해서는 일사가 없고, 기류속도가 1 m/s 미만으로 느리며, 실내·외 온도차가 최소 10-15℃ 이상으로 크고 벽체의 축열이 충분할 때 정확도가 높아진다고 서술하였다. Albatici의 열관류율 계산식은 이후 Vollmer(2010)와 Fokaides(2011)에 의하여 보완되었다.

이러한 현장 측정 방법은 지붕의 색상, 단열재 구성 등에 따른 열 성능을 비교하기 위한 연구에서 활용되었다. Synnefa(2006)는 일반적으로 사용되는 지붕의 마감재 코팅의 효과를 실험적으로 비교하기 위한 연구를 수행하였다. 표

면온도를 이용하여 열 성능을 평가하는 간단한 실험으로 다른 연구에 비해 비교적 많은 14가지 경우에 대해 데이터를 측정하였다. 시뮬레이션에서는 고려하기 힘든 날씨 변화에 따른 성능 변화 등은 실험을 통하여 유의미한 결과를 얻었다. 비슷한 연구를 Bozonnet(2011)은 시공이 완료된 주거용 건물의 지붕에 대하여 수행하였다. 지붕 재료의 시공 전후의 모니터링 결과를 비교하였고, 이는 전열해석을 이용하여 검증하였다. Belusko(2010)는 경사지붕을 통한 열류량을 정확하게 측정할 수 있는 실험체를 구축하여, 비교하고자 하는 세 가지 단열 수준에 대한 성능을 비교하였다. 각각에 대한 열저항을 계산 값과 비교하여 열 성능을 판별하고, 열교 발생 부위까지 판단하였다. Pisello(2014)는 벽체와 지붕이 시공된 완전한 주택형태의 실험체 2개를 시공하여, 외피 구성이 전혀 다르더라도 법규에 따라 시공한 경우 겨울철에 거의 비슷한 동적 열 특성을 갖는 것을 증명하였다. 실험을 통해 예측된 건물의 특성이 실제 특성과 큰 상관관계를 갖는 것을 확인하였다. 국내에서는 박병규(2001)가 지붕의 3가지 형태별, 5가지 방위별 열 성능을 판단하기 위해 축소모형을 이용하여 실험을 수행한 사례를 찾아볼 수 있다.

실험용 챔버를 구축하는 사례는 이론적 계산 모델을 보정하기 위한 연구에서도 찾아볼 수 있다. Miranville(2008)은 열대 기후에서 반사형 단열재 적용 시의 열저항을 계산하기 위한 단순화된 모델과 모델의 보정을 위한 실험의 두 가지 흐름으로 연구를 진행하였다. Kaşka(2008)도 마찬가지 방법으로, 지붕과 벽체에서의 비정상 열전달의 이론적 모델과 실험적 모델의 차이점을 분석하고 이론적 모델을 검증, 보정하는 과정을 서술하였다.

실험용 챔버나 현장 측정을 이용한 연구는 실제 외부 환경에 노출되어 보다 현실적인 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 그러나 대부분 실험체 또는 시편을 만드는데 따르는 시간적, 비용적 제약, 구축된 실험체의 수정, 이동 등에

대한 제약으로 한정된 경우에 대해서만 데이터를 얻는 경우가 많다. 따라서 연구 계획 단계에서도 충분한 이론적 검토가 이루어진 후 중요도가 높은 경우에 대해 실험이 수행되는 것이 일반적이다.

나. 전열해석을 통한 열 성능 평가

실험과 현장측정 이외에도 지붕의 열전달 해석에는 수치해석 기법을 이용한 전열해석이 많이 이용된다. 경우에 따라 연구자가 원하는 상황의 해석을 위해 직접 수치해석 코드를 작성하는 경우가 있고, 상용화된 프로그램을 이용하는 경우 또한 많이 찾아볼 수 있다. Gorthala(1994)는 지붕에서 발생하는 1차원 열전달을 정밀하게 해석하기 위해 유한차분법을 이용하여 직접 해석하였다. 에너지 보존에 관한 열확산 방정식 이외에 복사 열 수송에 관한 지배방정식, 물질이동에 관한 지배방정식을 이용하여 정량적이고 정확한 해석 결과를 도출하였다. Al-Sanea(2003)는 2차원 열전달이 발생하는 지붕에 대해 유한체적법을 이용하여 열확산 방정식을 직접 해석하였다. 지붕의 모델은 직교좌표를 이용하여 비교적 단순한 형태로 격자를 생성하였고, 정상-주기상태(Steady-periodic)의 경계조건을 이용하여 비정상해석을 수행하였다.

Déqué(2001)는 지붕을 포함한 공동주택의 부위 별 열교를 판별하기 위해 상용화된 프로그램인 Sisley를 이용하였다. 이를 바탕으로 부하계산 프로그램에 열교를 반영하여 계산의 정확도를 높였다. Ascione(2012)는 열교 부위에 대한 열손실을 부하계산 시 추가로 반영하는 3가지 방법을 비교하면서 수치해석 프로그램인 Fluent를 사용하였다. 1차원 열류량에 20%를 가산하는 방법, 병렬로 접속된 1차원 열류로 계산하는 방법, 수치해석을 이용한 방법을 비교하여 결과의 차이를 분석하였다. 이미진(2005)은 커튼월과 접합하는 지붕층 슬라브 접합 상세의 여러 대안을 전열 및 투습해석 상용 프로그램인

WUFI-2D로 비교하여 성능이 향상된 단열 계획안을 도출하였다.

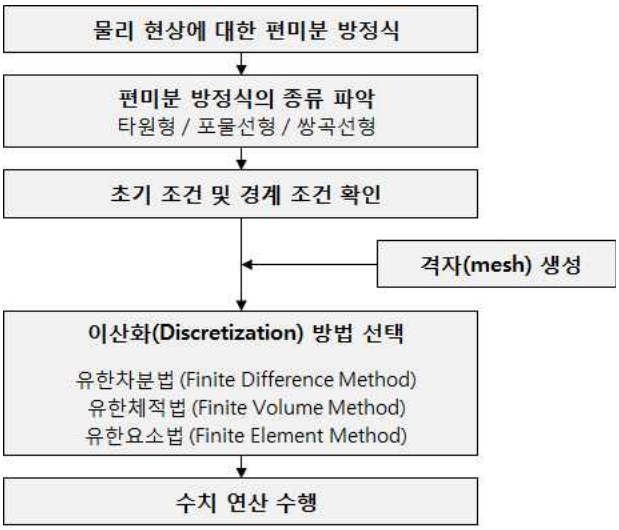
전열해석 프로그램을 이용하여 열전달 해석을 수행하는 방법은 격자의 조밀함을 위해 부재의 크기가 제한적이고 경계조건 산정 시 물리적 가정이 필요하다는 단점이 있지만, 다양한 상황에서의 열전달을 묘사할 수 있고, 아주 적은 오차의 정확한 결과를 도출한다는 장점이 있어 많은 연구에서 사용되는 연구방법이다. 이러한 방법은 결과의 정확성을 위해서는 검증을 통한 오차 비교와 보정의 과정이 뒤따를 필요가 있다.

2.4 수치해석 이론

2.4.1. 편미분 방정식의 수치해석 과정

매질 내의 열전도를 표현한 열확산 방정식은 매질 내에서의 연속적인 온도분포를 표현하고 있는 아날로그 형태의 방정식이라 할 수 있다. 따라서 매질의 형상과 경계조건이 간단한 제한적인 상황을 제외하고는 해석적인 방법으로 정밀 해를 구하는 것은 불가능하다. 따라서 대부분의 상황은 컴퓨터를 이용한 수치적인 방법으로 근사해를 풀어낸다. 수치적인 방법이란 아날로그 형태인 미분식을 컴퓨터에서 계산할 수 있는 디지털 형식의 이산화식으로 변형한 뒤, 이산화식과 초기조건 또는 경계조건 등의 이미 알고 있는 정보를 종합하여 모든 절점, 유한체적, 또는 유한요소에서의 근사해를 계산하는 것을 말한다.

편미분 방정식의 수치해석 알고리즘은 주로 [그림 2.7]과 같이 구성된다. 편미분 방정식의 형태에 따라 주어진 상황을 묘사하는 초기 조건 또는 경계 조건이 주어지면, 주어진 조건과 적절한 방법에 따라 이산화된 편미분 방정식을 이용하여 컴퓨터는 수치해를 계산한다. 수치해의 정확도와 안정성은 격자를 나누는 크기, 선택한 이산화 방법, 이산화식의 차원 등에 따라 결정되므로 이에 대한 충분한 이해와 검토가 필요하다.



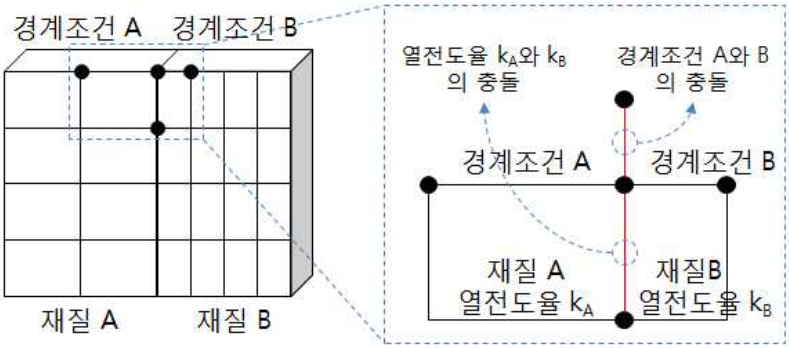
[그림 2.7] 일반적인 수치해석 알고리즘의 구성[16]

2.4.2. 이산화 방법의 장단점 비교

편미분 방정식의 수치해석 과정에서 사용되는 이산화 방법은 크게 유한차분법(FDM), 유한체적법(FVM), 유한요소법(FEM)으로 구분된다. 유한차분법은 주어진 미분식을 Taylor 급수 등을 이용하여 차분식으로 이산화하는 가장 직관적인 방법이다. 유한체적법은 운동량 및 질량 등 보존법칙을 만족하기 위해 미분식을 절점 주위의 유한체적에 대하여 적분하여 이산화하는 방법으로, 복잡한 형상에서 물리적 보존법칙을 만족하므로 물리적으로 직관적인 방법이다.[17] 마지막으로 유한요소법은 근사해의 수학적인 연속성을 보장하여 오차를 최소화하기 위해 각 요소 내에서 가중 함수를 고려하는 방법이다. 미분식을 바로 적분하는 것이 아니라, 미분식에 가중 함수를 고려하여 적분한 뒤 이산화하는 방법으로, 도함수의 연속성을 고려한 수학적으로 직관적인 방법이라 할 수 있다.

유한차분법은 격자 생성과 이산화를 간단하게 수행할 수 있어 격자 간격이 충분히 작다면 합리적으로 적용될 수 있는 방법이다. 또한, 미분식을 두 절점 간의 기울

16) 서승직, 최원기, 『건축 열환경 이론 및 분석 기초』, 일진사, 2009, p.234.
17) 명현국, 『Computational Fluid Dynamics』, 문운당, 2014, pp.35-36.

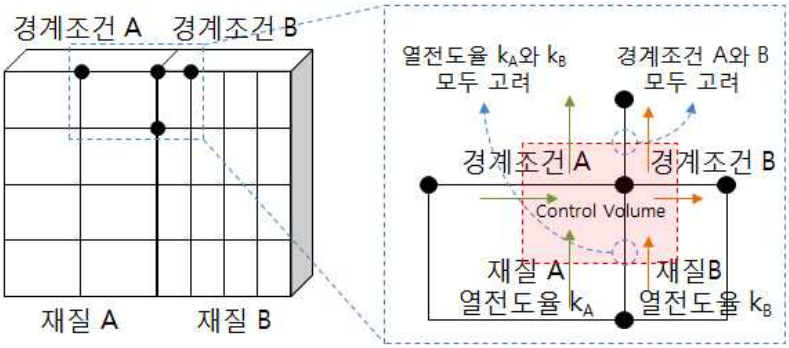


[그림 2.8] 유한차분법 이용 시 경계조건에서 기울기 정의 문제

기로 이산화하기 때문에 기울기가 정의될 수 있다면 다양한 좌표계에서 사용할 수 있다. 그러나 격자의 형상이 좌표계의 형상에 제한되므로 복잡한 형상에서 비정렬 격자를 생성하면 기울기(이산화식)가 정의되지 않아 격자 생성 시 어려움이 발생한다. 또한 유한차분법은 절점 위치에서만 물리량이 정의되므로 [그림 2.8]과 같이 서로 다른 지배방정식 또는 경계조건을 갖는 두 형상의 경계에서 기울기가 정의되지 않는 문제가 발생할 수 있고, 이는 오차를 증가시키는 원인이 될 수 있다.

유한차분법 사용 시 경계조건에서의 기울기 정의 문제는 물리 현상을 직관적으로 바라보면 해결될 수 있다. 각 절점의 값을 절점 부근의 유한체적을 대표하는 평균적인 물리량으로 보고, 두 절점 간의 관계를 하나의 기울기가 아닌 유한체적 간의 물리량 유출입으로 정의하면 [그림 2.9]와 같이 경계에서 충돌하는 물리적 조건은 유한체적 내의 각각의 적분 구간에 따라 고려할 수 있다. 마찬가지 원리로 비정렬 격자 이용 시에도 원래 좌표계 상의 기울기를 보존한 채 유한체적에 대해 적분하므로 격자 생성이 자유롭다는 장점이 있다. 그러나 유한체적법은 정밀도 향상을 위해 이산화식을 고차원화하는 경우 격자를 재생성할 수 있다는 제약이 있으며, 절점에서 도함수가 불연속하므로, 정밀해와 근사해의 오차가 발생할 수 있다는 단점이 있다.

구조해석, 열해석 등의 공학적 해석에서 가장 널리 이용되는 유한요소법은 유한체적법과 비슷하나, 보다 근접한 해를 얻기 위해 각 절점으로 이루어진 유한요소 내



[그림 2.9] 유한체적법 적용 시 경계조건 기울기 정의 문제 해결

<표 2.5> 이산화 방법 별 장단점 비교

이산화 방법	비정렬 격자 생성 (복잡한 형상)	이산화 시 고차원 근사	양해법(Explicit method) 에 의한 수치 연산
유한차분법(FDM)	불가능	가능	가능
유한체적법(FVM)	가능	가능 (격자 생성 제약)	가능
유한요소법(FEM)	가능	가능	불가능

에서 가중함수를 고려하여 수학적인 연속성을 보장하는 방법이다. 또한, 적절한 가중함수를 취함으로써 부분적분의 성질을 이용하여 피적분항(편미분방정식)의 미분차수를 낮출 수 있다는 계산상의 이점이 있다. 유한요소법에서는 절점 간의 값이 불연속적으로 연결되지 않고 연속적으로 연결되어 서로에게 동시에 영향을 준다는 특징이 있다. 따라서 전체 요소에 대해 한꺼번에 계산하는 음해법(Implicit method)만 적용되므로 계산 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다.

이상에서 서술한 유한차분법, 유한체적법, 유한요소법의 장단점은 <표 2.5>와 같이 나타낼 수 있다. 신한옥의 지붕과 같이 복잡한 형상의 열전달 해석을 위해서는 유한체적법 또는 유한요소법이 적절한 이산화 방법으로 사용될 수 있다.

2.5 소결

본 장에서는 신한옥 지붕에 대한 열전달 해석을 수행하기 위하여, 신한옥의 정의와 신한옥 지붕의 구성 요소를 파악하였고, 지붕의 열전달 해석에 관한 선행연구에 대한 고찰과 함께 수치해석 이론에 대하여 검토하였다. 본 장의 내용을 요약하면 다음과 같다.

1) 연구에 따르면 신한옥은 전통한옥의 전통 목구조와 외관을 유지하고, 건물의 거주 성능 향상을 위한 신기술 및 재료가 적용된 건축물로 정의된다. 법령 또는 지자체 조례에서는 신한옥이라는 용어를 따로 정의하지는 않지만, 한옥의 정의에 신한옥을 포함하기 위해 목구조와 한식기와의 사용, 또는 지붕틀, 마감재료 등 신한옥과 전통한옥의 공통적인 요소를 규정하고 있다. 신한옥의 지붕은 서까래와 상부에 다양한 층으로 구성된 지붕면, 측면에 위치한 박공벽과 박공, 그리고 서까래를 둘러싸며 건물의 내·외부를 구분하는 당골막이로 구성되어 있다.

2) 지붕의 열 성능은 간략한 열전달 해석 모델을 이용한 연구와 정밀한 열 성능 평가를 이용한 연구로 구분할 수 있다. 간략한 열전달 해석 모델을 이용한 연구는 주로 지붕에 대한 열적 네트워크 모델 또는 가중계수법을 이용하여 수행되었고, 지붕면 형상이 단순하고 다락 공간의 열전달이 지배적인 경우 높은 정확도를 보였다. 정밀한 열 성능 평가를 이용한 연구는 실험적인 방법과 수치적인 방법이 주로 이용되었다. 실험적인 방법은 경계 조건을 조절하기 쉬운 실험실 측정 방법과, 실제적인 경계 조건 묘사가 가능한 외부 조건에서의 측정 방법이 활용되었다. 실험적인 방법은 수식으로는 고려하지 못하는 물리적 변수를

결과에 반영할 수 있다는 장점이 있으나, 측정기기의 오차, 시·공간, 비용적 제약으로 인해 다양한 사례를 실험하기 어렵다는 단점이 있다. 수치적인 방법은 경계 조건의 변화나 평가 대상의 수에 대한 제약 없이 다양한 상황에서의 열전달을 판별하기 위해 활용되었다. 계산 결과가 수치적인 근사해라는 근본적인 단점이 있지만, 적절한 격자 크기와 해석 방법을 사용하여 결과의 신뢰성을 충분히 보장받을 수 있다. 수치적인 방법은 계산 이후 올바른 결과 분석을 위해 검증의 과정이 뒤따를 필요가 있다.

3) 열전달에 관한 지배방정식을 정밀하게 해석하기 위한 수치해석 과정을 검토하였다. 지배방정식의 형태에 따라 필요한 조건이 달라지며, 격자의 크기, 이산화 방법 등에 따라 결과의 정확도가 달라진다. 이산화방법으로는 유한차분법, 유한체적법, 유한요소법이 주로 사용되며, 본 연구에서는 신한옥 지붕의 형상을 보다 정확히 묘사할 수 있도록, 비정형격자 생성이 가능한 유한체적법 또는 유한요소법이 적절할 것으로 판단된다.

제 3 장 신한옥 지붕의 열 성능 비교 평가

3.1 개요

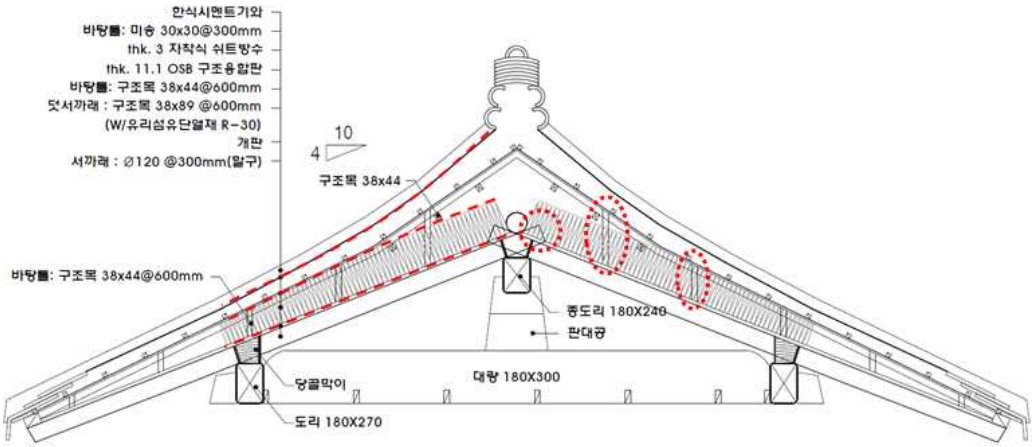
본 장에서는 신한옥 지붕의 열 성능을 정성적 분석하고, 이를 바탕으로 신한옥 지붕의 열 성능을 다른 형태의 주택 지붕과 정량적으로 비교하고자 한다. 정량적 해석에 앞서, 접합부위가 많고 형상이 복잡한 신한옥 지붕의 정확한 모델링이 가능하도록 지붕의 부위 별 열전달 특성을 정성적으로 파악하였다. 이를 바탕으로 신한옥과 전통한옥의 열 성능을 3차원 전열해석 방법을 이용하여 계산하였으며, 신한옥과 다른 형태의 주택 지붕 간의 열 성능을 동등한 조건에서 비교하도록 현대 주택의 경사 지붕, 패시브하우스의 지붕 사례에 대한 전열해석을 추가적으로 실시하였다. 신한옥 지붕의 전열해석 결과는 지붕 구성이 비슷한 신한옥에 대한 실측으로, 현대주택 및 패시브하우스의 지붕은 관련 문헌에서 제시된 값을 이용하여 검증하였다.

3.2 신한옥 지붕의 부위 별 열전달 정성적 분석

3.2.1. 지붕면을 통한 열전달 분석

신한옥 맞배지붕의 지붕면 단면의 예시는 [그림 3.1]과 같다. 지붕의 시공 사례에 따라 차이가 발생할 수 는 있지만, 일반적으로 지붕면의 두께는 위치에 따라 변화하며, 단열재는 지붕틀이나 서까래 등 부재에 의해 일부 관통되기도 하는 것을 확인할 수 있다. 지붕면의 두께 변화를 먼저 살펴보면, 붉은 색으로 표시된 부분과 같이 단열재의 두께는 약 150mm부터 240mm까지 변화하여 약 1.6배의 두께 차이가 발생한다. 단열재가 지붕의 열관류율에 가장 큰 영향을 미치는 것을 고려할 때 이 같은 두께 변화는 열 성능에 상당한 차이를 발생시킬 것으로 예상된다.

또한 해당 단면에서 지붕면에 시공된 유리섬유단열재의 열전도율은 약 0.036



[그림 3.1] 신한옥 맞배지붕의 단면 예시 및 추가적 열손실 예상 부위

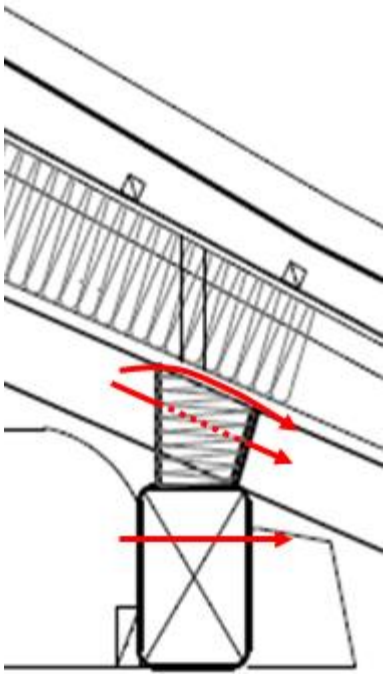
W/m·K이며, 지붕틀의 목재는 약 0.19 W/m·K로, 5배 정도의 열전도율 차이가 있다. 목재의 열저항이 단열재에 비해 상대적으로 작기 때문에, 목재 지붕틀을 따라 더 많은 열류가 발생하여 추가적인 열손실이 발생할 것으로 예상된다. 비록 지붕틀 부재의 두께가 얇아 이는 전체 열 성능에 큰 영향을 미치지는 않을 수 있으나, 열전달 해석 시 고려해야할 부분이다. 서까래가 단열재를 일부 관통한 부분도 마찬가지로, 단열재에서 서까래가 차지하는 부분에서 서까래의 열전도율이 상대적으로 높아 열 성능 저하의 원인이 될 것으로 예상된다.

3.2.2. 당골막이와 박공벽을 통한 열전달 분석

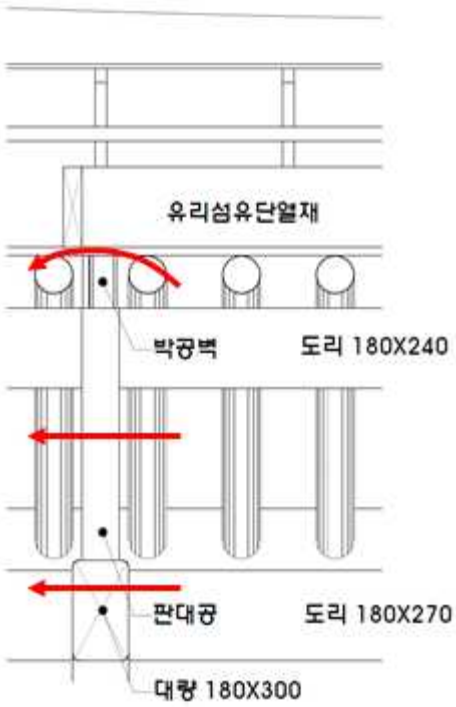
당골막이와 박공벽에서도 마찬가지 이유로 열저항이 상대적으로 작은 부재가 단열재 등을 관통하면서, 추가적인 열손실이 발생할 것으로 예상된다. [그림 3.2]에서 나타난 당골막이 부위의 확대 단면에서 가장 상부에 있는 열류의 경우, 서까래 상부에 시공된 개판이 상부에 있는 유리섬유단열재와 당골막이에 시공되는 폴리스티렌 사이를 가로지름으로 인해 추가적 열류가 발생한다. 또한, 당골막이가 감싸고 있는 서까래와, 당골막이 하부의 도리부분은 목재가 실내·외로 그대로 노출되기 때문에 도리와 서까래를 따라서 중간과 하단의 화살표와 같이 열교가 발생할 것으로 예상

된다. 도리와 서까래뿐만 아니라, 그 주위의 접합 경계에서도 단열재가 시공되지 않았으므로 추가적인 열손실이 발생할 것으로 판단된다.

신한옥 맞배지붕의 측면에 위치한 박공벽을 확대하여 나타낸 단면은 [그림 3.3]과 같다. 박공벽과 판대공을 경계로 오른쪽은 실내, 왼쪽은 실외를 나타내며, 당골막이 부위와 마찬가지로 추가적인 열손실이 예상되는 부위를 붉은색 화살표로 나타냈다. 먼저, 박공벽에 시공되는 대량과 판대공은 도리 등의 구조 부재와 마찬가지로 단열이 시공되지 않고 목재가 그대로 실내·외로 노출되는 형태이다. 따라서 이들 부재를 따라서, 또는 단열된 박공벽과 이들 부재의 접합 경계면을 따라서 단열된 면보다 많은 열류가 발생할 것으로 예상된다. 가장 상단에 있는 열류 역시 당골막이에서 개판에 의한 열류와 거의 동일한 이유로, 지붕면을 따라 시공되는 단열재가 개판에 의해 박공벽면의 단열재와 연속되지 못하여 추가적인 열손실이 발생한다.



[그림 3.2] 당골막이 부위의 확대 단면 및 추가적 열손실 예상 부위



[그림 3.3] 박공벽 부위의 확대 단면 및 추가적 열손실 예상 부위

3.3 신한옥 지붕의 열 성능 비교 평가 방법

3.3.1. 열 성능 평가 도구

본 연구에서는 겨울철 조건에서 신한옥 지붕을 통한 열손실을 정량적으로 계산하여 분석하는 것을 목표로 하고 있다. 일반적으로 겨울철 난방 공간의 벽체나 지붕은 축열이 완전히 되어있고, 기온 변화가 크지 않아 정상상태 열전달을 가정하는 것이 합리적이다. 다양한 형태의 지붕의 열 성능을 동일한 실내·외 경계조건에서 비교하기 위해 상용 프로그램을 이용하였다. 프로그램 선정 시에는 모델링 시 발생하는 부재의 간섭의 최소화, 경사 부재 모델링을 위한 좌표 변경 가능성, 격자 크기의 최적화 가능성 등을 고려하였다.

프로그램은 Dassault Systèmes사의 Solidworks Simulation을 선정하였다. Solidworks는 3차원 CAD를 기반으로 하는 프로그램으로, 개별 부재를 따로 모델링하고 이를 조립하는 방식으로 모델링이 진행된다. 이로 인해 각 부재 간 간섭을 조립과정에서부터 쉽게 제거할 수 있고, 개별 부재 모델링 시 좌표 입력이 간편하다는 장점이 있다. 모델링 결과는 열전달 해석 기능과 바로 연동되어 경계조건, 요구로 하는 격자의 크기 등을 입력하면 전열해석이 수행된다. 유한요소법을 이용하여 복잡한 형상에 대한 비정렬 격자 생성이 가능하며, 부재의 크기에 맞게 격자의 크기가 범위 내에서 자동으로 조절되는 기능을 제공하고 있다.

3.3.2. 실내·외 환경 경계 조건

가. 실내·외 입력 온도 조건

전열해석 시 사용되는 실내·외 환경의 경계조건을 설정하기 위하여 선행 연구를 참조하였다. 국내·외 기준에서 제시된 실내 및 실외의 환경조건은 각각 <표 3.1>과 <표 3.2>에 정리하였다. 본 연구에서는 정리된 내용을 바탕으로 실내 온도 입력 조건으로 20℃를 설정하였다. 이는 KS, 건축물의 에너지절약설계기준, BS, DIN 기

준에 모두 부합하는 값이다. 대부분 바닥 복사 난방 방식이 적용되는 신한옥의 실내 온도는 사무소 공간의 공조 온도보다 낮을 것으로 예상되기 때문에 제시된 기준 중 최솟값을 선택하였다.

본 연구는 표준적인 겨울철 극한 외기조건을 설정하여 정상상태 전열해석에 활용하기 위해 거의 발생하지 않는 극한의 최저 온도보다는 비교적 많은 시간 발생하는

<표 3.1> 실내온도 표준 조건 관련 자료[18)]

기준	건물 용도	온도 (℃)
KS F 2295 창호의 결로 방지 성능 시험 방법 (창 및 문의 결로 방지성능 시험시 유지해야 하는 항온항습실의 공기 온습도)	-	20
난방장치 용량계산을 위한 실내온습도 기준 (건축물의 에너지절약설계기준)	공동주택	20 ~ 22
LH 공사 시방서 (단열 성능 및 표면결로 방지 성능 측정 시 유지해야 하는 항온항습실의 공기 온습도)	주거	25
BS 6229 Flat roofs with continously supported coverings - Code of practive, Table 6, 7	사무소	20
2012 ASHRAE Handbook - HVAC Application, Table 1 General Design Criteria	사무소	20.3 ~ 24.2
DIN 1408-3, ärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Tabelle A.1	모든 건물	20

<표 3.2> 동계 외기온도 표준 조건 관련 자료[19)]

기준		지역	온도 (℃)
낭방장치의 용량계산을 위한 설계 외기온도 기준 (건축물의 에너지절약설계기준)		서울 지역	-11.3
지역별 결로 실험을 위한 외기온도		중부 지역	-15.0
LH 공사 시방서 (단열 성능 및 표면결로 방지 성능 측정 시 유지해야 하는 저온실의 공기 온도)		중부 지역	-15.0
표준 기후 데이터	최저 외기온도	서울 지역 (01.12 23:00)	-16.5
	동계 설계 외기 온도	서울 지역	-11.6

18) 임아람, 사무소 건물 커튼월 시스템의 표면결로 방지 성능 기준에 관한 연구, 이화여자대학교 대학원 석사학위 논문, 2013, p.22. (표 내용 일부 수정)
19) Ibid, p.23..

동계의 극한 외기 온도 조건을 이용하였다. 따라서 건축물의 에너지절약설계기준에 부합하며, 표준 기후 데이터의 설계 기준과 비슷한 -11.3℃를 입력 조건으로 설정하였다.

나. 실내·외 표면 열전달계수

부재의 표면에서는 대류 열전달이 발생하는 경계 조건을 고려하였다. 이 때 사용되는 대류 열전달 계수는 부재의 표면 형상, 표면 온도 또는 주변 공기 온도, 공기의 유동 속도 등에 따라 값이 민감하게 변화하는 값으로 정확한 값을 입력하는 것은 한계가 있다. 자유대류 조건에서 대류 열전달 계수의 값은 약 6~30 W/㎡·K[20]으로 값 자체도 상당히 넓은 범위에서 존재하는 것을 알 수 있다. 하지만 6~30 W/㎡·K의 열저항은 약 0.03~0.17 ㎡·K/W의 수준으로 240mm의 유리섬유단열재의 열저항 6.67 ㎡·K/W 보다 현저히 낮은 수준이다. 결론적으로 대류 열전달 계수를 다소 부정확하게 입력하더라도 전체 열저항에 미치는 영향은 아주 적다고 볼 수 있으며, 다양한 지붕 형태의 비교 평가가 목적인 본 연구에서는 각 경우에서 통일된 열전달 계수를 사용하는 것이 더욱 중요하다. 따라서 본 연구에서는 건축물의 에너지절약설계기준[21]에 제시된 실내 및 실외측 표면 열전달저항을 이용하였다. 열전달저항의 역수인 열전달계수를 대한 정보는 <표 3.3>과 같다.

<표 3.3> 실내 및 실외측 표면 열전달계수

건물 부위	실내표면열전달계수 (W/m²·K)	실외표면열전달계수 (W/m²·K)	
		외기에 간접 면하는 경우	외기에 직접 면하는 경우
최상층에 있는 거실의 반자 또는 지붕	11.63	11.63	23.26

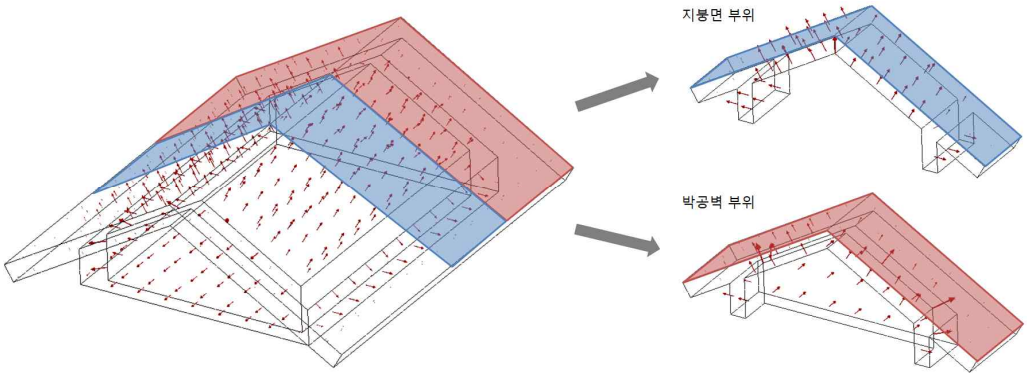
20) Kreider, J. F.,Curtiss, P. S. and Rabl, A, *Heating and Cooling of Buildings: Design for Efficiency*, CRC Press, 2010, p.44..
21) 국토교통부, 건축물의 에너지절약설계기준 [국토교통부고시 제2014-957호, 2014.12.30., 일부개정]

3.3.3. 주택 유형 별 평가 대상 지붕 모델

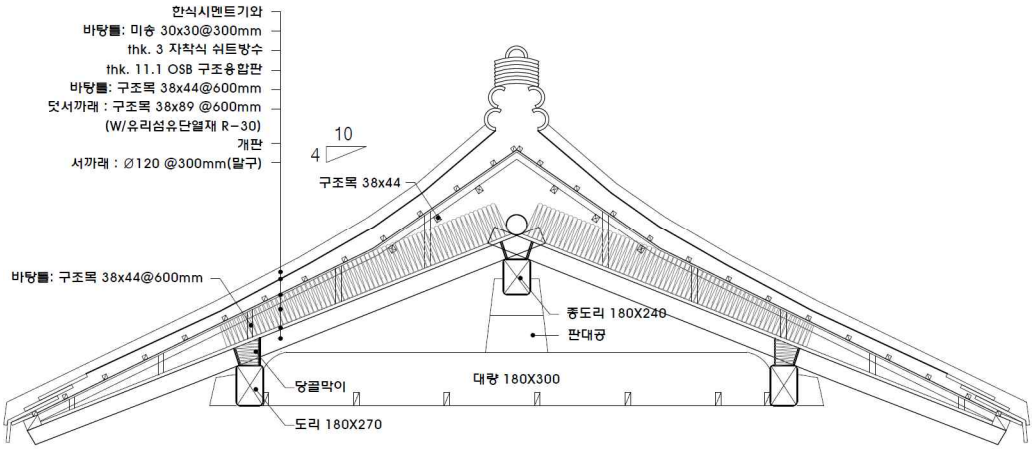
서론에서 언급된 바와 같이 본 연구에서는 신한옥의 비교 대상으로, 신한옥과 형태가 동일한 전통한옥, 이론적인 열 성능이 동일한 현대 주택, 궁극적인 목표의 열 성능 수준을 갖는 패시브하우스를 선정하였다. 동등한 조건에서 각각의 열 성능 평가가 가능하도록 형태가 비슷한 경사지붕을 동일한 부위로 나누어 모델링하였다. 지붕 전체를 하나의 모델로 모델링하는 것은 계산 시간이나 격자 크기 등의 측면에서 불리할 수 있어, 열전달 패턴이 일정한 부위를 나누어 모델링하였다. 경사지붕의 형태 상 지붕면 상부 모서리 방향으로 일정한 열류 패턴이 반복되고, 양단의 박공벽 부위에서는 지붕면과는 다른 방향의 열류가 발생하므로 [그림 3.4]와 같이 각각에 대해 지붕면 부위 모델, 박공벽 부위 모델을 작성하였다. 지붕면 또는 박공벽 부위 내에서는 모서리 부위에서의 정확한 해석을 위해 모델을 더 작게 나누지 않았다.

가. 신한옥 지붕 모델

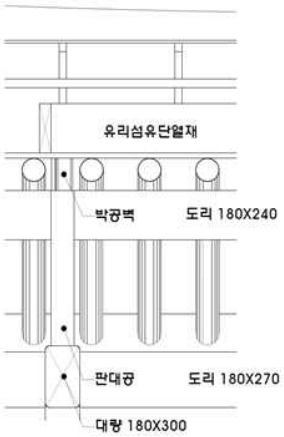
신한옥 지붕의 전열해석을 위한 모델은 산림청에서 개발한 전라남도 한옥 표준모델을 바탕으로 간단화한 가상의 한옥을 선정하였다. 신한옥은 현대 주택과 마찬가지로 지붕 내부 구성요소에 대한 통일된 기준은 제시되고 있지 않기 때문에 대표성이 있는 지붕 내부의 구성을 위해 한옥 표준 모델을 이용하였다. 지붕면과 박공벽에



[그림 3.4] 지붕의 전열해석 시 부위 별 모델링 개념도



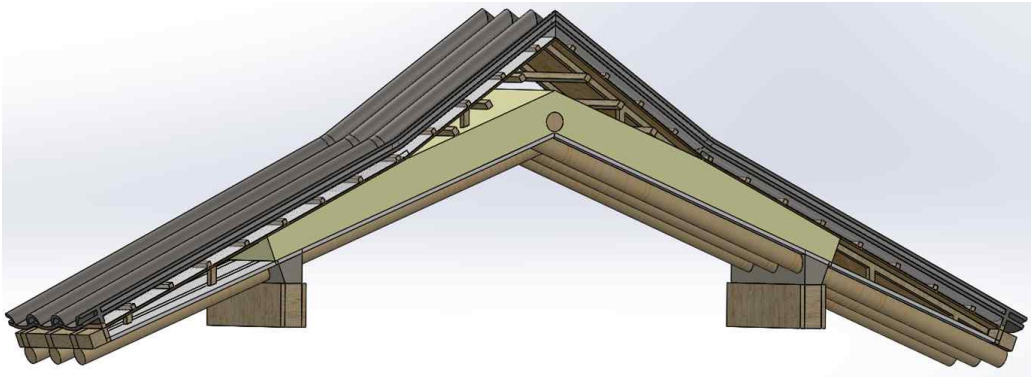
[그림 3.5] 신한옥 지붕의 전열해석 대상 모델의 지붕면 단면도



[그림 3.6] 신한옥 지붕의 전열해석
대상 모델의 박공벽 단면도

대한 단면은 각각 [그림 3.5]와 [그림 3.6]과 같다.

모델링 결과 지붕면 부위의 모델은 [그림 3.7]과 같다. 지붕면 방향의 열류에서 지붕틀과 서까래가 단열재를 관통하면서 발생하는 열 성능 저하 여부를 판단하기 위해 모델에 포함하였다. 또한 접합부에서의 열손실을 정확하게 파악하기 위해 도리와 당골막이까지 지붕의 구성요소로 포함하였다. 도면에 제시된 부재의 크기와, 부재 간 간격 등을 이용하여 동일한 상세를 유지하여 모델링하였으며, 모델의 폭은 서까래 간격과 단열조건을 고려하여 900mm로 설정하였다.

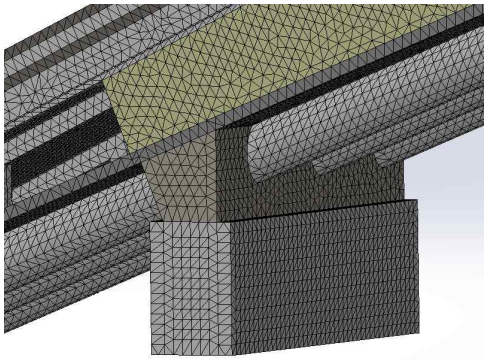


[그림 3.7] 신한옥 지붕의 전열해석 대상 지붕면 부위 모델

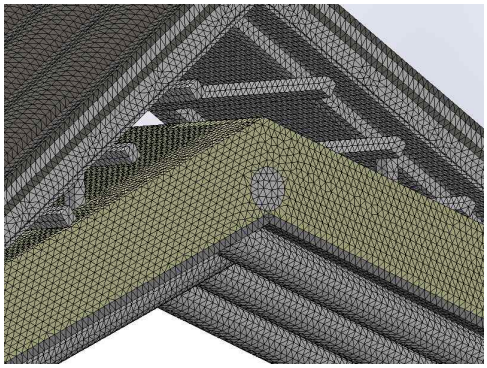
[그림 3.8] 신한옥 지붕의 전열해석 대상 박공벽 부위 모델

신한옥 박공벽 부위의 모델을 외부에서 나타내면 [그림 3.8]과 같다. 지붕면 부위 모델에서 박공벽, 대량 및 판대공 등 부재가 추가한 형태로, 박공벽 외부의 돌출 부위는 전체 결과에 큰 영향이 없을 것으로 판단되어 일부만 모델에 포함하였다. 지붕면 부위 모델과 마찬가지로 도면에서 제시된 부재의 크기와 간격을 그대로 모델링하였다.

각 부위의 모델에서 격자의 최대 크기는 약 21.74 mm, 최소 크기는 약 1.09 mm로 부재의 크기에 맞게 격자를 생성하였으며, 표준 메시 옵션을 이용하였다. 두 모델의 주요 위치에서의 격자 형태는 각각 [그림 3.9] 및 [그림 3.10]과 같다.

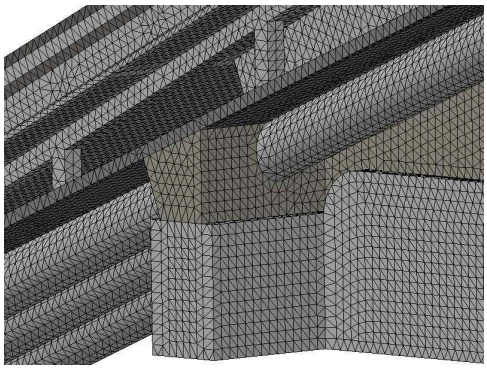


(a) 당골막이 부위

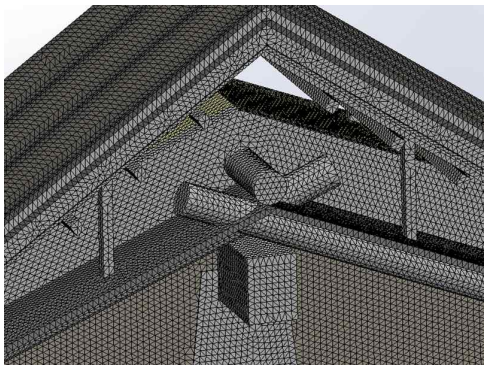


(b) 서까래 교차 부위

[그림 3.9] 신한옥 지붕면 부위 모델의 주요 위치에서의 격자



(a) 당골막이 부위



(b) 서까래 교차 부위

[그림 3.10] 신한옥 박공벽 부위 모델의 주요 위치에서의 격자

모델에서 사용된 부재의 열전도율은 대부분 에너지절약 설계기준 해설서[22]에서 제공하는 재료별 열전도율 값을 이용하였으며, 일부는 독일 공업규격을 정리한 국내 데이터[23]를 이용하였다. 사용된 재료의 열전도율은 <표 3.4>에 정리하였다. 이 중 기와 바로 하단에 있는 중공층은 전체 열전달에 크게 영향을 미치지 않을 것으로 판단되어 전도 열전달로 대신하였으며, 대류열전달계수 11.63 $W/m^2 \cdot K$와 중공층의 평균 두께 114mm를 이용하여 0.66 $W/m^2 \cdot K$의 값을 도출하였다.

22) 국토교통부, 건축물의 에너지절약 설계기준 해설서 [국토교통부고시 제2014-957호], 2015, pp.151-156.

23) http://www.phiko.kr/bbs/board.php?bo_table=z3_01&wr_id=2 (한국패시브건축협회 - 단열재 및 기타재료의 열전도율)

<표 3.4> 신한옥 지붕 모델에서 사용된 재료의 열전도율

부재	재료	열전도율 (W/m·K)
서까래, 보 및 도리, 지붕틀, 구조목, 개판	목재(중량)	0.19
미송	소나무	0.13
당골막이	폴리스티렌	0.025
단열재	유리섬유단열재(32K)	0.036
OSB합판	OSB	0.13
방수시트	PE필름	0.21
석고보드	석고보드	0.18
스터코(회벽바름)	석회석고몰탈	0.70
한식시멘트기와	기와	0.75
기와내부중공층	$k = \frac{h_1 h_2}{h_1 + h_2} \times \Delta x = \frac{h \times \Delta x}{2}$ (대류열전달계수 이용 계산)	0.66

나. 전통한옥 지붕 모델

신한옥과 전통한옥은 대체로 구조와 외관이 거의 동일하고, 지붕 내부 구성에 있어서만 차이를 보인다. 따라서 신한옥과 전통한옥의 열 성능 차이를 동일한 조건에서 분석하기 위해서는 각각의 모델을 동일한 형태로 묘사하는 것이 더욱 유리할 것으로 판단된다. 따라서 전통한옥 지붕의 전열해석 모델은 별도의 사례를 선정하지 않고, 앞서 이용된 신한옥 모델에서 지붕 서까래 등 구조 부재를 제외한 내부의 모든 부재가 흙으로 대체된 것으로 가정하였다.

전통한옥의 지붕면 부위, 박공벽 부위에 대한 모델은 각각 [그림 3.11], [그림 3.12]에 나타내었다. 격자의 크기도 신한옥 지붕 모델과 동일한 수준으로, 최대 21.74 mm, 최소 1.09 mm로 구성하였다. 전통한옥 지붕에 사용된 재료는 목재와 흙으로, 각각의 열전도율은 신한옥 모델에서와 동일한 자료를 인용하였다. 전통한옥 지붕 모델에서 사용된 재료의 열전도율은 <표 3.5>에 정리하였다.

[그림 3.11] 전통한옥 지붕의 전열해석 대상 지붕면 부위 모델

[그림 3.12] 전통한옥 지붕의 전열해석 대상 박공벽 부위 모델

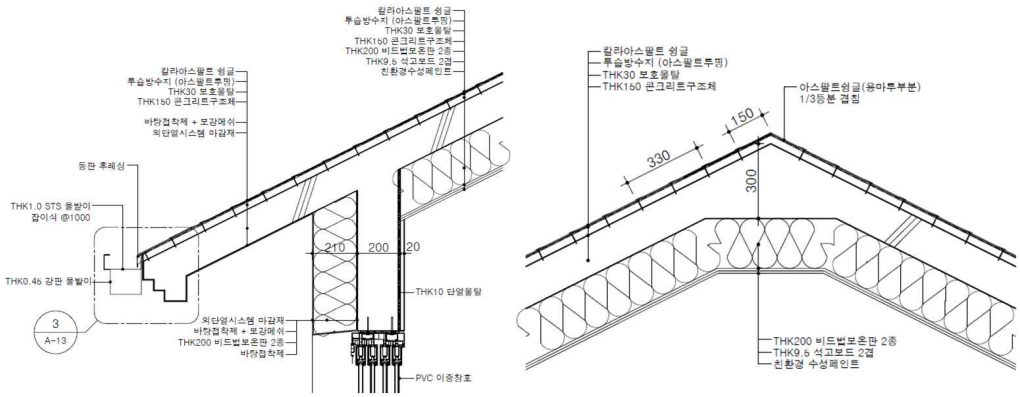
<표 3.5> 전통한옥 지붕 모델에서 사용된 재료의 열전도율

부재	재료	열전도율 (W/m·K)
서까래, 보 및 도리, 지붕틀, 구조목, 개판	목재(중량)	0.19
미송	소나무	0.13
지붕 내부, 박공벽, 당골막이	흙	0.46
한식시멘트기와	기와	0.75

다. 현대 주택 지붕 모델

신한옥 지붕의 열 성능 비교평가를 위한 현대 주택은 지붕의 형태가 비슷하도록 경사지붕을 갖는 철근콘크리트조의 주택으로 선정하였다. 신한옥과 마찬가지로 다양한 현대 주택 형태 중 대표성을 갖도록 농림축산식품부에서 개발한 농촌주택 표준설계도를 이용하였다. 다만, 신한옥과 비슷한 크기에서 열 성능 비교가 가능하도록 지붕의 폭을 일부 축소하여 신한옥과 비슷한 수준을 유지하였다. 벽체와 지붕 접합부와 지붕면이 교차하는 용마루 부위에 대한 상세는 [그림 3.13]과 같다. 지붕에는 200mm의 비드법보온판이 내단열로, 벽체에는 200mm의 비드법보온판이 외단열로 시공되었다.

현대 주택 지붕에 대한 지붕면과 박공벽 부위의 모델은 각각 [그림 3.14], [그림 3.15]와 같다. 상세도에 제시된 재료와 규격은 지붕의 폭을 제외하고 대부분 그대로 묘사하였으며, 물받이 등은 열 성능에 영향이 없을 것으로 판단되어 반영하지 않았다. 격자의 크기는 최대 19.34mm, 최소 0.91mm로 신한옥 및 전통한옥의 지붕과 비슷한 수준을 유지하였으며, [그림 3.16]과 같다. 벽체와

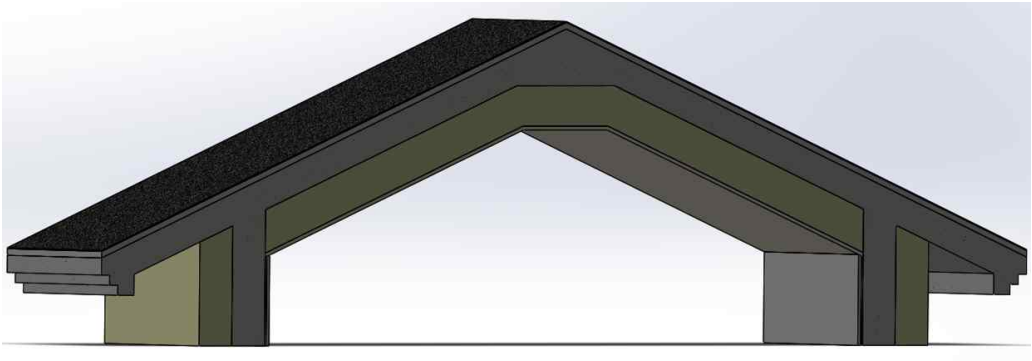


(a) 벽체-지붕 접합부 (b) 지붕면 교차부

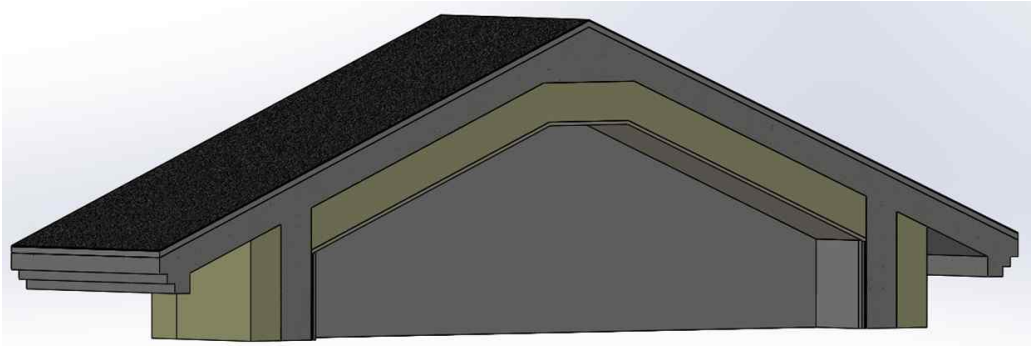
[그림 3.13] 현대 주택 지붕의 주요 부위 단면 상세도[24)]

24) 농림축산식품부, 농촌주택 표준설계도서(농림-12-26-가-1), 2012. (국토교통부 공고 제 2014-1548호(2014.12.15.)

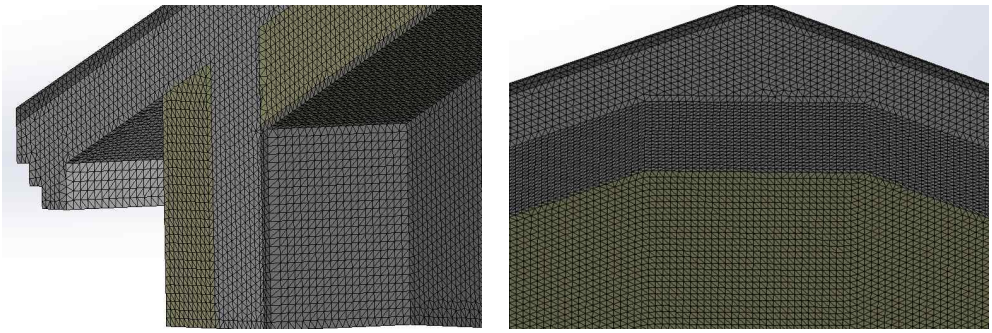
지붕 구성 재료의 규격을 참고하여 열전도율과 열저항, 열관류율을 정리하면 다음 <표 3.6>, <표 3.7>과 같다. 열전도율은 신한옥 지붕 모델과 마찬가지로 에너지절약 설계기준 해설서를 참조하였다.



[그림 3.14] 현대 주택 지붕의 전열해석 대상 지붕면 부위 모델



[그림 3.15] 현대 주택 지붕의 전열해석 대상 박공벽 부위 모델



(a) 지붕-벽체 접합부 (b) 지붕 상부 모서리 부위

[그림 3.16] 현대 주택 지붕 모델의 주요 위치에서의 격자

<표 3.6> 현대 주택의 벽체에서 사용된 재료의 두께 및 열저항

부재	두께 (mm)	열전도율 (W/m·K)	열저항 (m^2·K/W)
시멘트모르타르	18	1.400	0.013
단열모르타르	10	0.710	0.014
콘크리트	200	0.350	0.571
비드법보온판 2종	200	0.032	6.250
표면 열전달저항			0.153
전도 열저항 합계			7.001
열관류율 (W/m^2·K)			0.143

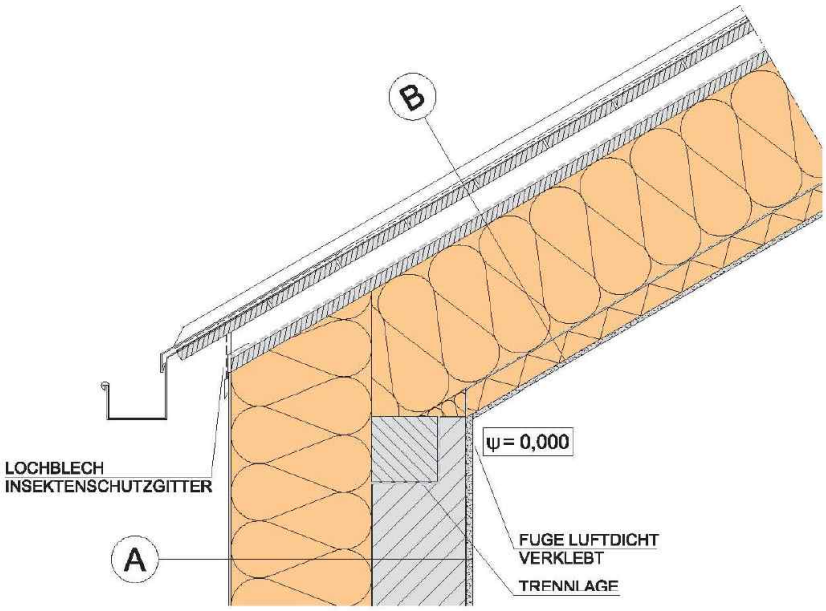
<표 3.7> 현대 주택의 지붕에서 사용된 재료의 두께 및 열저항

부재	두께 (mm)	열전도율 (W/m·K)	열저항 (m^2·K/W)
석고보드(2겹)	19	0.180	0.106
비드법보온판 2종	200	0.032	6.250
콘크리트	150	0.350	0.429
보호모르타르	20	1.400	0.014
칼라아스팔트싱글	5	0.270	0.019
표면 열전달저항			0.129
전도 열저항 합계			7.001
열관류율 (W/m^2·K)			0.144

라. 패시브하우스 지붕 모델

신한옥 지붕의 열 성능 비교 평가를 위한 패시브하우스의 지붕 사례는 독일의 Gemeinschaft Dämmstoff Industrie에서 제공하는 시공 사례를 참조하였다.[25] 한옥의 당골막이 부위에 해당하는 경사지붕과 벽체의 접합부 단면은 [그림 3.17]과 같다. 벽체의 구조부재로는 콘크리트를 사용하였고, 지붕의 구조 부재로는 콘크리트 대신 80mm * 280mm의 목재 서까래를 이용하였다. 벽체는 300mm의 복합 단열 시스템이 적용되었고, 지붕에는 280mm의 셀룰로오즈 단열재가 시공되었다.

25) GDI - Gemeinschaft Dämmstoff Industrie, *PASSIVHAUS - Details Fur Anwender*, GDI, 2004, p.20. (Massivbau GDI-Nr 1.15)



[그림 3.17] 패시브하우스 지붕과 벽체의 접합부 단면

인용된 자료에서 함께 제시하고 있는 벽체와 지붕의 구성 재료와 두께, 열전도율 및 종합 열관류율은 <표 3.8>과 <표 3.9>에 정리하였다. 제시된 구성 재료를 바탕으로 신한옥과 비슷한 형상으로 지붕면 모델, 측면 벽체부 모델을 모델링하였다. 그러나 통기성 지붕이 적용되어 환기구의 온도는 외부 온도와 거의 동일할 것으로 판단되어 금속 루핑과 지붕피복에 대해서는 모델에 포함하지 않았다. 재료의 열전도율은 자료에 제공된 값을 사용하였고, 그 값이 제공되지 않은 콘크리트는 앞서 인용한 에너지절약 설계기준 해설서의 데이터를 이용하여 콘크리트 1.6 W/m·K를 사

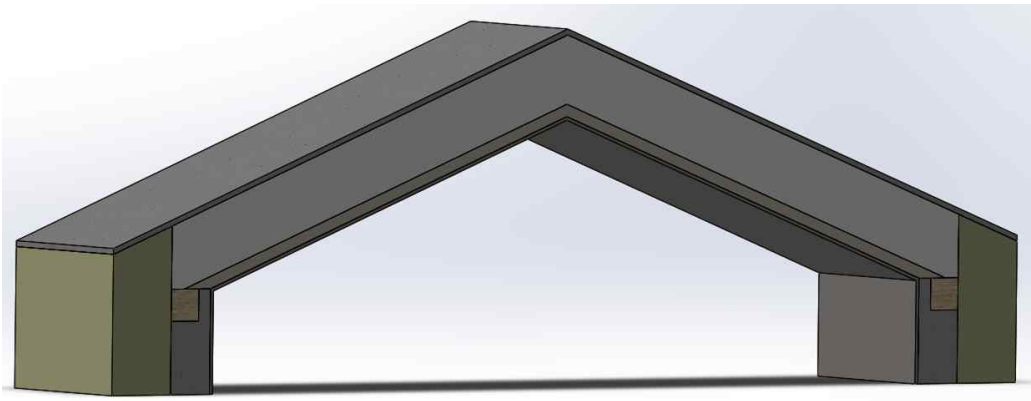
<표 3.8> 패시브하우스의 벽체에서 사용된 재료의 두께 및 열저항

부재	두께 (mm)	열전도율 (W/m·K)	열저항 (m^2·K/W)
복합 단열 시스템	300	0.040	7.500
콘크리트	200	0.350	0.571
내부 마감	15	0.870	0.017
표면 열전달저항			0.170
전도 열저항 합계			8.088
열관류율 (W/m^2·K)			0.121

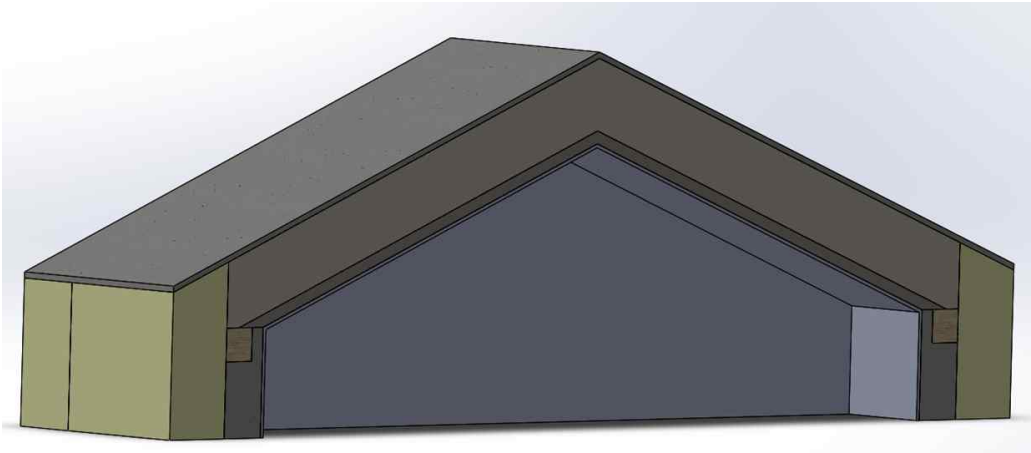
용하였다. 패시브하우스의 지붕에 대한 지붕면과 박공벽 부위의 모델은 각각 [그림 3.18], [그림 3.19]와 같다. 격자의 크기는 최대 0.79mm, 최소 15.83 mm로 신한옥 및 전통한옥의 지붕과 비슷한 수준을 유지하였으며, [그림 3.20]과 같다.

<표 3.9> 패시브하우스의 지붕에서 사용된 재료의 두께 및 열저항

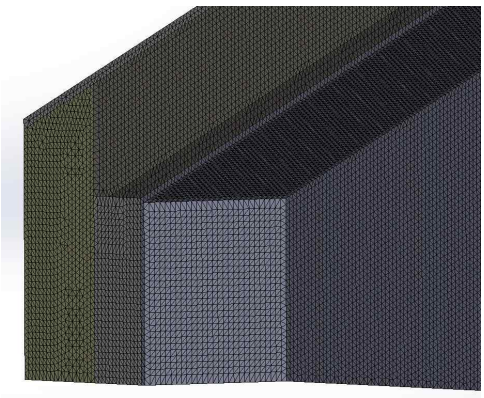
부재	두께 (mm)	열전도율 (W/m·K)	열저항 (m^2·K/W)
금속 루핑	-	-	-
지붕 피복	24	-	-
환기 (통기성 지붕)	50	-	-
콘크리트	24	-	-
서까래 (80*280mm) @800	280 (지붕면적의 10%)	0.130	0.215
셀룰로오즈 단열재	280 (지붕면적의 90%)	0.039	6.462
방습층	-	-	-
단열 경량 패널	50	0.090	0.556
내부 마감	15	0.870	0.017
표면 열전달저항			0.170
전도 열저항 합계			7.250
열관류율 (W/m^2·K)			0.135



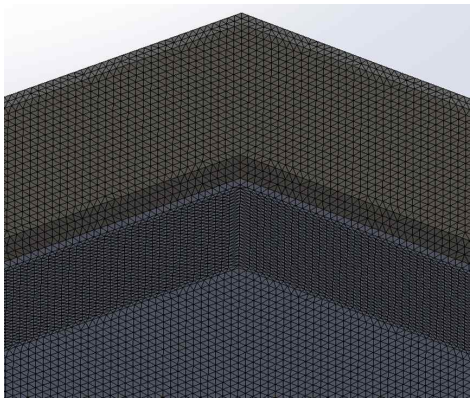
[그림 3.18] 패시브하우스 지붕의 전열해석 대상 지붕면 부위 모델



[그림 3.19] 패시브하우스 지붕의 전열해석 대상 박공벽 부위 모델



(a) 지붕-벽체 접합부



(b) 지붕 상부 모서리 부위

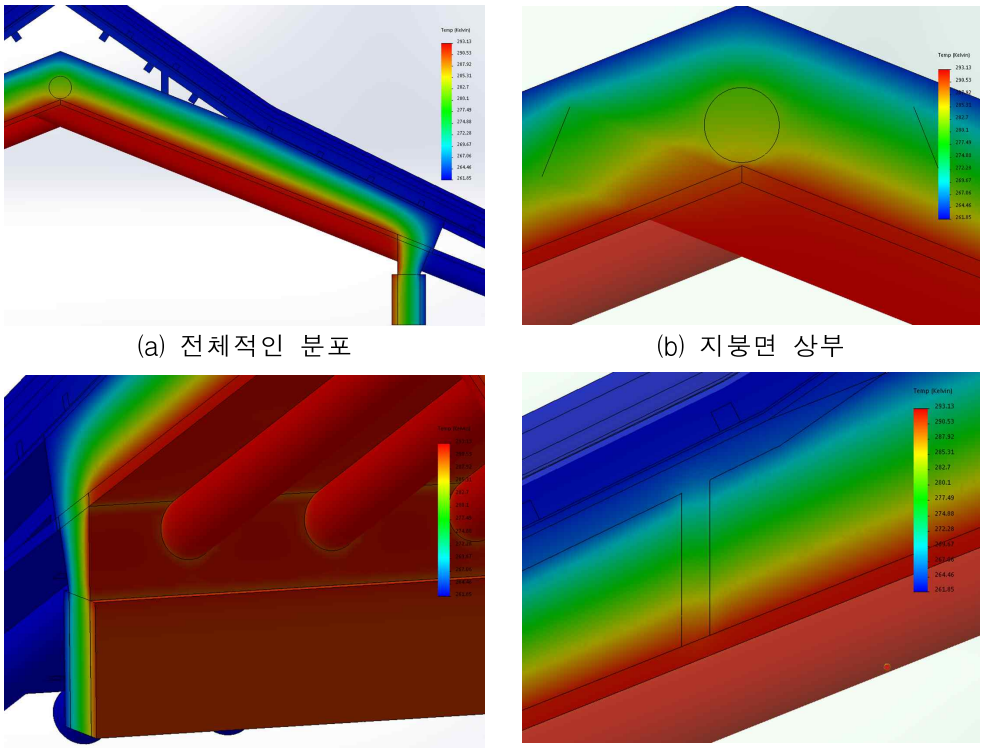
[그림 3.20] 패시브하우스 모델의 주요 위치에서의 격자

3.4 열 성능 평가 결과

앞서 서술된 모델을 이용하여 전열해석을 실시한 결과 모델의 각 지점에서의 온도, 열유속 데이터를 도출하였다. 동일한 실내·외 환경조건을 입력하였기 때문에 각 모델 별 동일 위치에서의 실내 표면온도 또는 열유속을 비교하면 지붕 형태 별 상대적인 열 성능 비교가 가능하다.

3.4.1. 신한옥 지붕 모델의 전열해석 결과

신한옥 지붕의 지붕면 부위 모델 해석 결과 주요 위치에서의 온도와 열유속 분포를 살펴보면 각각 [그림 3.21], [그림 3.22]와 같이 나타낼 수 있다. 온도는 실내에서 실외로 등고선이 형성되어 각 위치에서의 대략적인 온도 값을 확인할 수 있고,

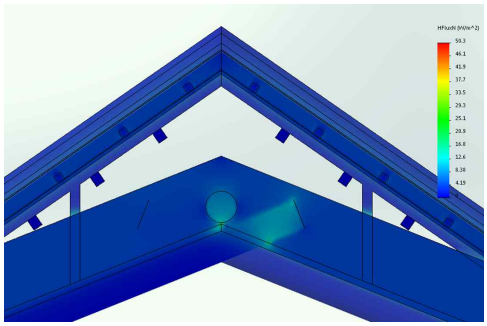


(a) 전체적인 분포 (b) 지붕면 상부

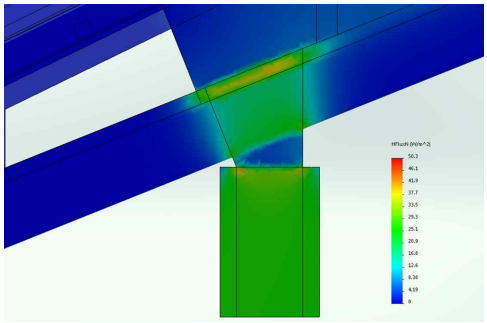
(c) 벽체-지붕 접합부 (d) 지붕틀 부위

[그림 3.21] 신한옥 지붕면 부위 모델 해석 결과 각부 온도 분포

열유속의 경우 벡터 플롯 형태로 열류의 방향과 크기를 대략적으로 확인할 수 있다. 실내측 표면온도의 통계는 <표 3.10>에, 주요 부위 별 열유속 통계는 <표 3.11>에 요약하였다. 각각의 부재 별로 최댓값 및 최솟값, 평균값, RMS값을 계산하여 요약하였다.



(a) 지붕면 상부



(b) 벽체-지붕 접합부

[그림 3.22] 신한옥 지붕면 부위 모델 해석 결과 각부 열유속 분포

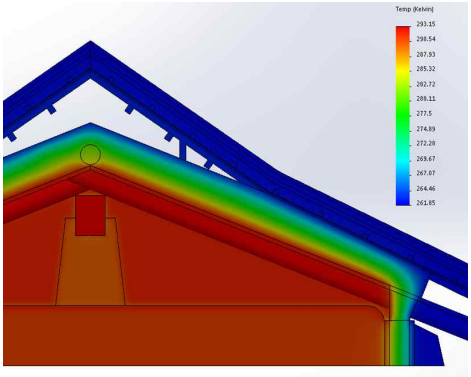
<표 3.10> 신한옥 지붕면 부위 모델 내부 표면 온도

부재	최고온도(℃)	최저온도(℃)	평균값(℃)	RMS값(℃)
실내표면	19.63	12.52	19.09	19.11

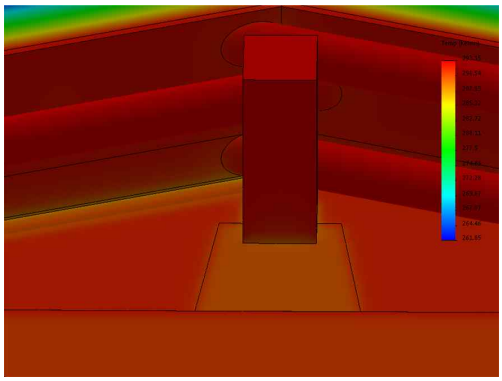
<표 3.11> 신한옥 지붕면 부위 모델 부재 별 열유속

부재	최고 열유속 (W/m^2)	최저 열유속 (W/m^2)	평균값(W/m^2)	RMS값(W/m^2)
실내표면 전체	50.26	4.37	9.36	12.22
개판 전체	50.26	4.37	6.60	8.20
개판 중심부	6.16	4.36	4.90	4.92
개판-서까래둘레	20.85	7.17	10.02	10.48
개판 상부모서리	18.68	14.71	16.40	16.45
당골막이 전체	50.26	5.49	12.12	15.94
당골막이 중심부	5.88	5.49	5.63	5.63
당골막이 상부모서리	50.26	22.02	40.33	40.94
당골막이 하부모서리	37.02	30.1	32.39	32.40
당골막이-서까래둘레	44.04	20.33	25.93	26.27
도리	37.02	10.55	24.39	24.74

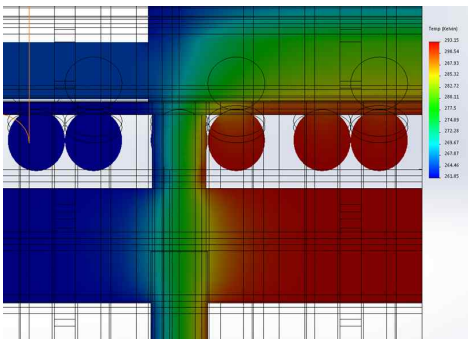
신한옥 지붕의 박공벽 부위 모델 해석 결과 주요 위치에서의 온도와 열유속 분포는 각각 [그림 3.23], [그림 3.24]에 표현하였다. 실내측 표면온도의 통계는 <표 3.12>에, 주요 부위 별 열유속 통계는 <표 3.13>에 요약하였다. 마찬가지로 각각의 부재에 대해 최댓값 및 최솟값, 평균값, RMS값을 계산하여 요약하였다.



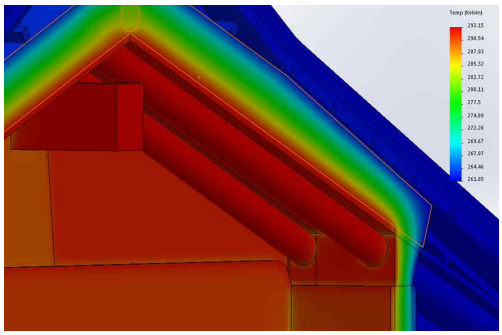
(a) 전체적인 분포



(b) 지붕면 상부

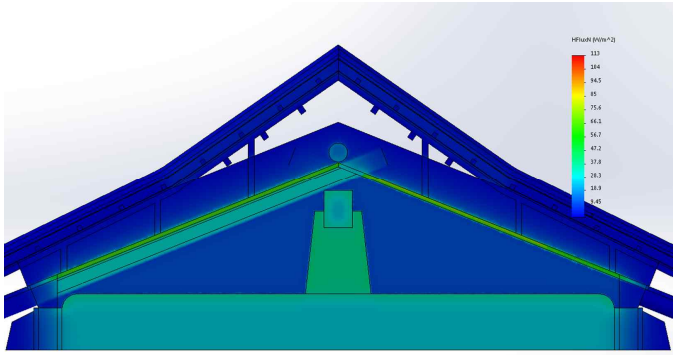


(c) 박공벽 단면

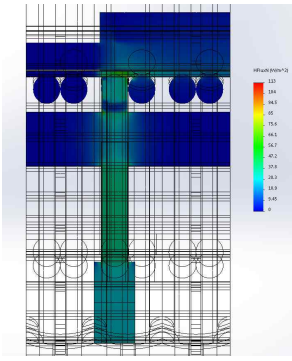


(d) 벽체-지붕 접합부

[그림 3.23] 신한옥 박공벽 부위 모델 해석 결과 각부 온도 분포



(a) 지붕-박공벽 접합부 단면



(b) 박공벽 단면

[그림 3.24] 신한옥 박공벽 부위 모델 해석 결과 각부 열유속 분포

<표 3.12> 신한옥 박공벽 부위 모델 내부 표면 온도

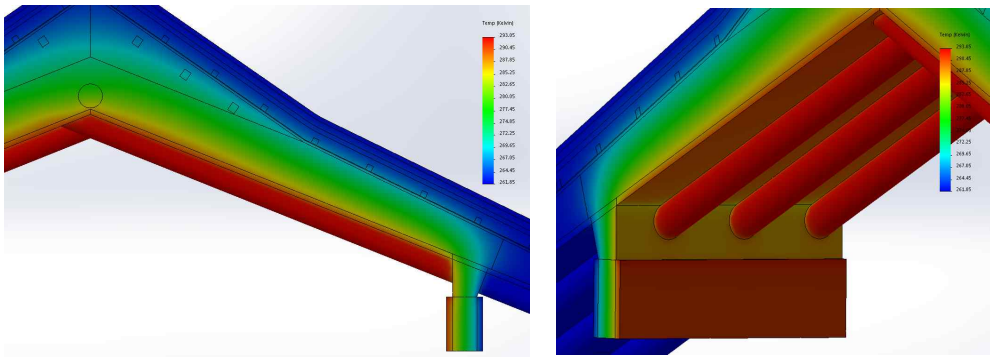
부재	최고온도(℃)	최저온도(℃)	평균값(℃)	RMS값(℃)
실내표면	19.63	10.54	18.36	18.35

<표 3.13> 신한옥 박공벽 부위 모델 부재 별 열유속

부재	최고 열유속 (W/m^2)	최저 열유속 (W/m^2)	평균값(W/m^2)	RMS값(W/m^2)
실내표면 전체	113.35	4.35	20.13	24.04
개판 전체	113.35	4.35	15.35	24.32
개판 중심부	6.15	4.35	5.00	5.04
개판-서까래둘레	82.40	7.55	17.91	23.89
개판 상부모서리	55.54	18.02	31.05	33.50
당골막이 전체	93.78	5.50	14.51	19.78
당골막이 중심부	5.89	5.50	5.64	5.64
당골막이 상부모서리	93.78	15.91	44.61	47.52
당골막이 하부모서리	69.46	28.74	36.55	37.77
당골막이-서까래둘레	54.95	19.68	27.71	28.29
도리	82.99	10.87	27.35	28.43
대량 및 판대공	54.24	9.30	26.29	26.98
박공벽 전체	109.27	10.57	18.54	23.12
박공벽 중심부	10.60	10.57	10.58	10.58
박공벽모서리	109.27	10.54	45.74	48.82
서까래(박공벽관통)	69.73	28.62	32.70	33.01
서까래모서리 (박공벽관통)	60.61	29.75	34.26	34.54

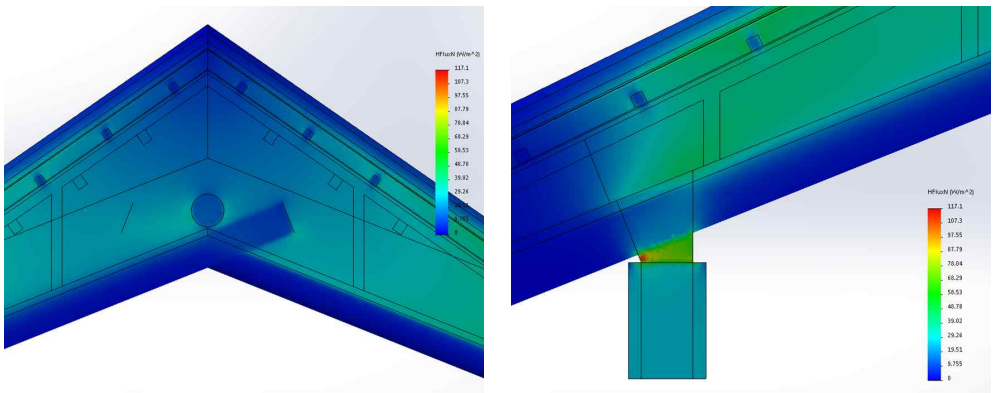
3.4.2. 전통한옥 지붕 모델의 전열해석 결과

신한옥 지붕과 마찬가지로 방법으로 전통한옥의 지붕 전열해석 결과를 나타내었다. 지붕면 모델의 주요 위치에서 온도와 열유속 분포는 각각 [그림 3.25], [그림 3.26]에, 실내측 표면온도 통계는 <표 3.14>, 주요 부위 별 열유속 통계는 <표 3.15>에 요약하였다.



(a) 전체적인 분포 (b) 벽체-지붕 접합부

[그림 3.25] 전통한옥 지붕면 부위 모델 해석 결과 각부 온도 분포



(a) 지붕면 상부 (b) 벽체-지붕 접합부

[그림 3.26] 전통한옥 지붕면 부위 모델 해석 결과 각부 열유속 분포

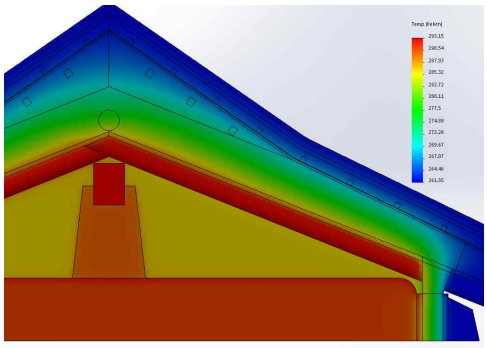
<표 3.14> 전통한옥 지붕면 부위 모델 내부 표면 온도

부재	최고온도(℃)	최저온도(℃)	평균값(℃)	RMS값(℃)
실내표면	19.90	10.99	18.04	18.01

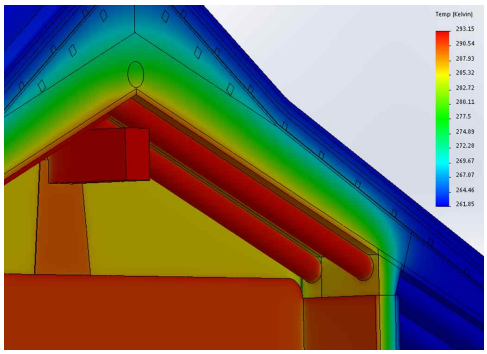
<표 3.15> 전통한옥 지붕면 부위 모델 부재 별 열유속

부재	최고 열유속 (W/m^2)	최저 열유속 (W/m^2)	평균값(W/m^2)	RMS값(W/m^2)
실내표면 전체	117.06	11.77	37.90	40.09
개판 전체	102.71	15.67	37.27	38.27
개판 중심부	43.37	28.03	34.66	36.10
개판-서까래둘레	44.33	15.67	29.02	30.28
개판 상부모서리	48.10	33.08	41.69	41.86
당골막이 전체	117.06	39.23	69.66	70.17
당골막이 중심부	73.02	68.77	70.42	70.43
당골막이 상부모서리	102.71	63.03	77.39	77.62
당골막이 하부모서리	64.59	53.57	56.41	56.44
당골막이-서까래둘레	80.17	39.23	57.69	58.75
도리	64.59	11.77	25.87	26.79

박공벽 모델의 주요 위치에서 온도와 열유속 분포는 각각 [그림 3.27], [그림 3.28]에, 실내측 표면온도 통계는 <표 3.16>, 주요 부위 별 열유속 통계는 <표 3.17>에 요약하였다.

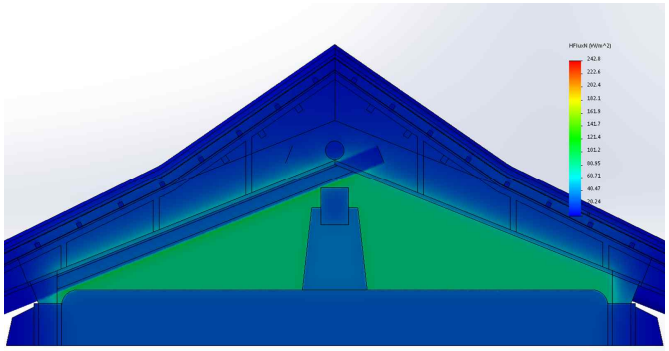


(a) 전체적인 분포

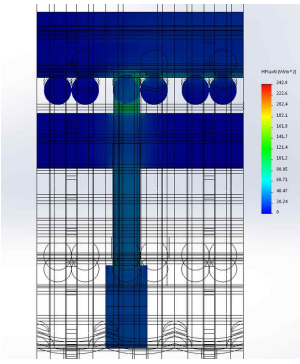


(b) 벽체-지붕 접합부

[그림 3.27] 전통한옥 박공벽 부위 모델 해석 결과 각부 온도 분포



(a) 지붕-박공벽 접합부 단면



(b) 박공벽 단면

[그림 3.28] 전통한옥 박공벽 부위 모델 해석 결과 각부 열유속 분포

<표 3.16> 전통한옥 박공벽 부위 모델 내부 표면 온도

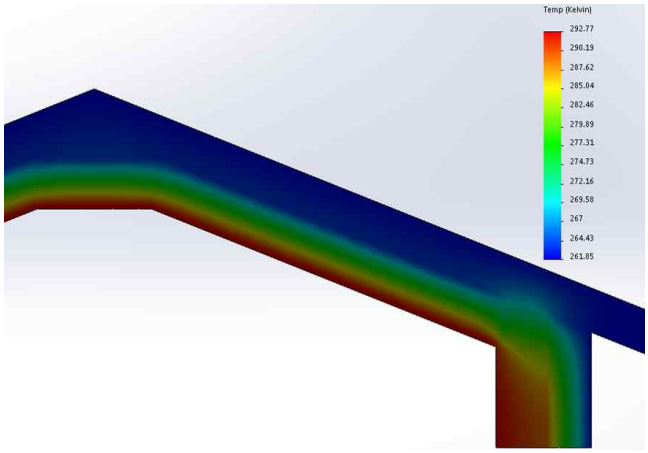
부재	최고온도(℃)	최저온도(℃)	평균값(℃)	RMS값(℃)
실내표면	19.27	6.50	15.70	15.69

<표 3.17> 전통한옥 박공벽 부위 모델 부재 별 열유속

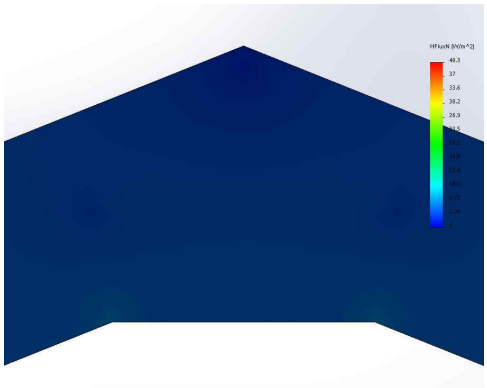
부재	최고 열유속 (W/m^2)	최저 열유속 (W/m^2)	평균값(W/m^2)	RMS값(W/m^2)
실내표면전체	242.84	10.17	51.15	57.11
개판 전체	140.55	17.87	48.60	51.15
개판 중심부	45.45	30.09	35.68	35.90
개판-서까래둘레	113.27	17.87	38.96	42.90
개판 상부모서리	77.59	38.02	56.00	57.41
당골막이 전체	242.84	40.05	79.82	82.67
당골막이 중심부	73.08	69.34	70.81	70.81
당골막이 상부모서리	136.38	32.62	81.33	84.35
당골막이 하부모서리	120.79	55.18	64.42	65.23
당골막이-서까래둘레	139.91	40.05	69.06	72.74
도리	120.79	12.47	29.34	31.37
대량 및 판대공	112.54	10.17	29.56	31.73
박공벽 전체	183.64	35.43	82.12	82.85
박공벽 중심부	83.3	82.63	83.08	83.08
박공벽모서리	183.64	53.74	88.47	89.94
서까래(박공벽관통)	89.95	31.09	38.83	39.48
서까래모서리 (박공벽관통)	89.95	53.74	70.12	71.01

3.4.3. 현대 주택 지붕 모델의 전열해석 결과

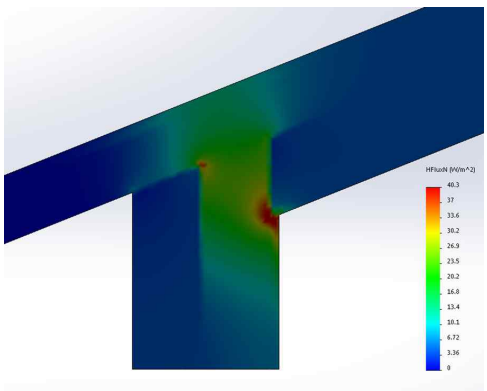
지붕면 모델의 주요 위치에서 온도와 열유속 분포는 각각 [그림 3.29], [그림 3.30]에, 실내측 표면온도 통계는 <표 3.18>, 주요 부위 별 열유속 통계는 <표 3.19>에 요약하였다.



[그림 3.29] 현대 주택 지붕면 부위 모델 해석 결과 전체적인 온도 분포



(a) 지붕면 상부



(b) 벽체-지붕 접합부

[그림 3.30] 현대 주택 지붕면 부위 모델 해석 결과 각부 열유속 분포

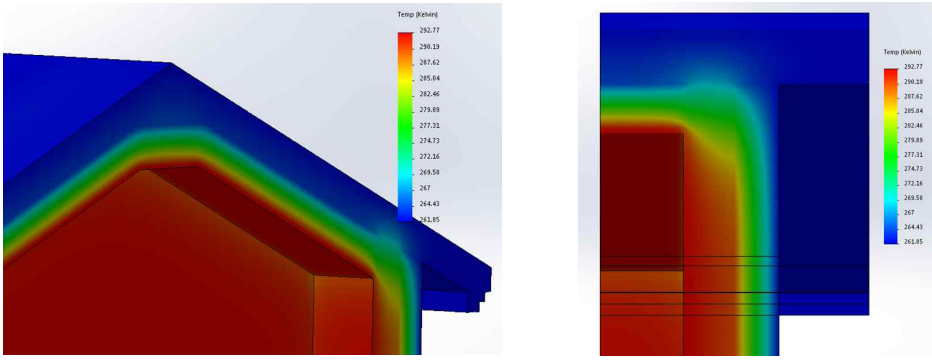
<표 3.18> 현대 주택 지붕면 부위 모델 내부 표면 온도

부재	최고온도(℃)	최저온도(℃)	평균값(℃)	RMS값(℃)
실내표면	19.62	17.23	19.34	19.33

<표 3.19> 현대 주택 지붕면 부위 모델 부재 별 열유속

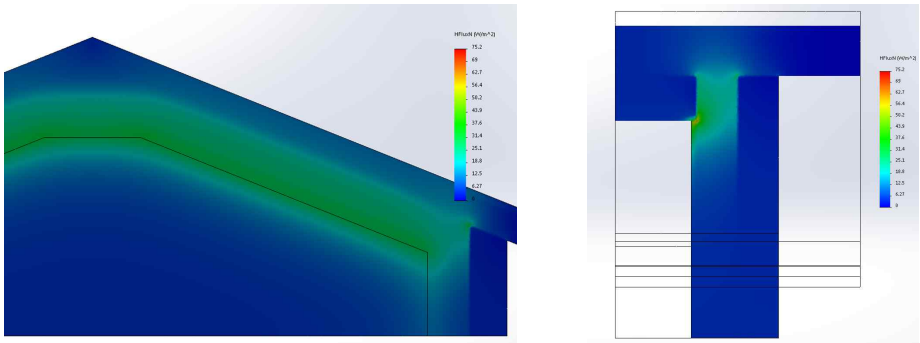
부재	최고 열유속 (W/m^2)	최저 열유속 (W/m^2)	평균값(W/m^2)	RMS값(W/m^2)
실내표면 전체	40.31	4.44	7.12	9.53
지붕면 전체	33.12	4.44	4.95	5.39
지붕면 중심부	4.54	4.50	4.51	4.51
지붕면 교차부	6.55	6.35	6.42	6.42
벽체면 전체	40.31	7.45	16.53	18.98
벽체면 중심부	4.49	4.45	4.47	4.47
벽체-지붕 접합부	33.02	22.44	25.93	26.01

박공벽 모델의 주요 위치에서 온도와 열유속 분포는 각각 [그림 3.31], [그림 3.32]에, 실내측 표면온도 통계는 <표 3.20>, 전체 및 열교 예상 부위의 부위 별 열유속 통계는 <표 3.21>에 요약하였다.



(a) 전체적인 분포 (b) 박공벽 단면

[그림 3.31] 현대 주택 박공벽 부위 모델 해석 결과 각부 온도 분포



(a) 지붕-박공벽 접합부 단면 (b) 박공벽 단면

[그림 3.32] 현대 주택 박공벽 부위 모델 해석 결과 각부 열유속 분포

<표 3.20> 현대 주택 박공벽 부위 모델 내부 표면 온도

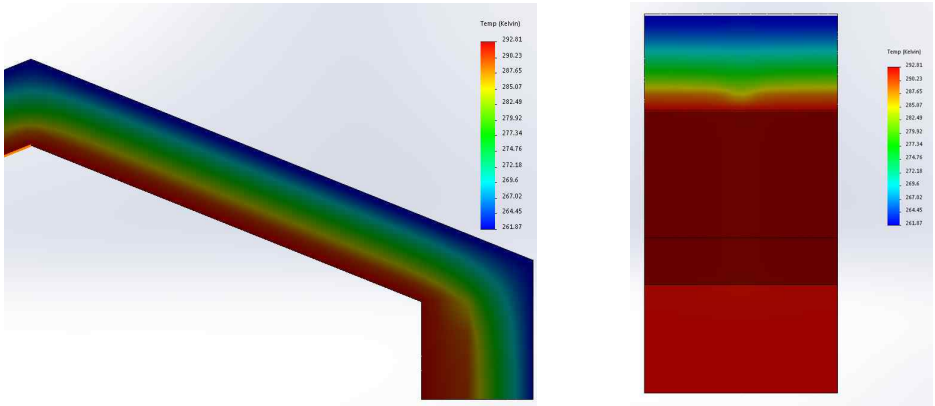
부재	최고온도(℃)	최저온도(℃)	평균값(℃)	RMS값(℃)
실내표면	19.62	15.44	19.07	19.07

<표 3.21> 현대 주택 박공벽 부위 모델 부재 별 열유속

부재	최고 열유속 (W/m^2)	최저 열유속 (W/m^2)	평균값(W/m^2)	RMS값(W/m^2)
실내표면 전체	75.24	4.42	11.26	14.96
지붕면 전체	45.62	4.42	6.95	9.17
지붕면 중심부	4.54	4.44	4.48	4.48
지붕면 교차부	36.93	6.34	8.56	10.34
박공벽/벽체면 전체	75.24	4.57	13.53	17.33
박공벽/벽체면 중심부	4.69	4.57	4.61	4.61
벽체-지붕 접합부	44.71	21.94	29.32	29.59
박공벽-지붕면 접합부	75.24	25.82	39.45	41.91

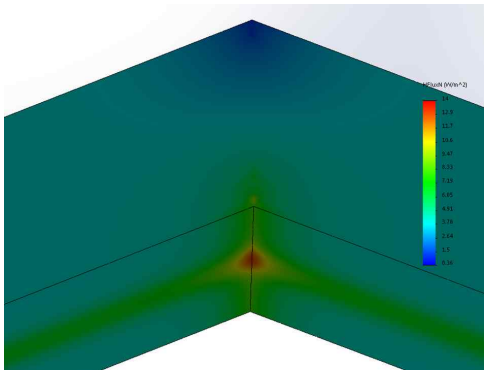
3.4.4. 패시브하우스 지붕 모델의 전열해석 결과

지붕면 모델의 주요 위치에서 온도와 열유속 분포는 각각 [그림 3.33], [그림 3.34]에, 실내측 표면온도 통계는 <표 3.22>, 전체 및 열교 예상 부위의 부위 별 열유속 통계는 <표 3.23>에 요약하였다.

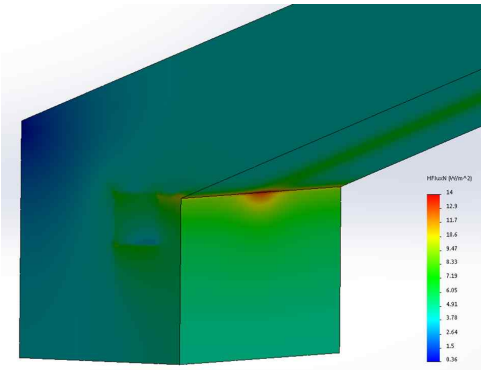


(a) 전체적인 분포 (b) 지붕면 단면

[그림 3.33] 패시브하우스 지붕면 부위 모델 해석 결과 각부 온도 분포



(a) 지붕면 상부



(b) 벽체-지붕 접합부

[그림 3.34] 패시브하우스 지붕면 부위 모델 해석 결과 각부 열유속 분포

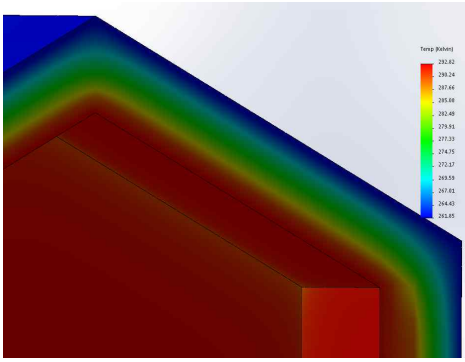
<표 3.22> 패시브하우스 지붕면 부위 모델 내부 표면 온도

부재	최고온도(℃)	최저온도(℃)	평균값(℃)	RMS값(℃)
실내표면	19.66	18.96	19.40	19.45

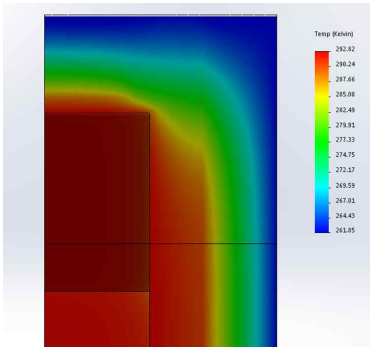
<표 3.23> 패시브하우스 지붕면 부위 모델 부재 별 열유속

부재	최고 열유속 (W/m^2)	최저 열유속 (W/m^2)	평균값(W/m^2)	RMS값(W/m^2)
실내표면 전체	14.02	3.97	5.21	5.39
지붕면 전체	14.01	3.97	5.04	5.22
지붕면 중심부 (서까래 열손실 고려)	6.8	3.97	4.52	4.60
지붕면 중심부	4.00	3.98	3.98	3.98
지붕면 교차부	13.33	7.90	9.38	9.53
벽체면 전체	13.84	4.68	6.00	6.19
벽체면 중심부	3.87	3.68	3.76	3.76
벽체-지붕 접합부	13.84	10.33	11.45	11.50

박공벽 모델의 주요 위치에서 온도와 열유속 분포는 각각 [그림 3.35], [그림 3.36]에, 실내측 표면온도 통계는 <표 3.24>, 전체 및 열교 예상 부위의 부위 별 열유속 통계는 <표 3.25>에 요약하였다.

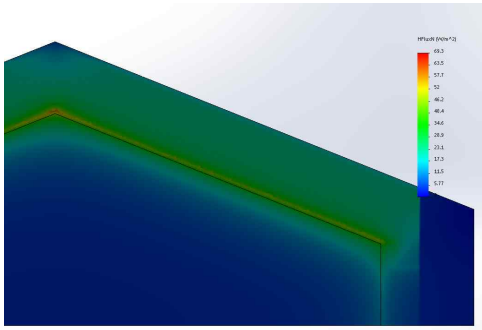


(a) 전체적인 분포

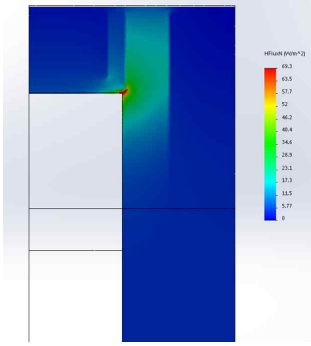


(b) 박공벽 단면

[그림 3.35] 패시브하우스 박공벽 부위 모델 해석 결과 각부 온도 분포



(a) 지붕-박공벽 접합부 단면



(b) 박공벽 단면

[그림 3.36] 패시브하우스 박공벽 부위 모델 해석 결과 각부 열유속 분포

<표 3.24> 패시브하우스 박공벽 부위 모델 내부 표면 온도

부재	최고온도(℃)	최저온도(℃)	평균값(℃)	RMS값(℃)
실내표면	19.67	15.67	19.14	19.18

<표 3.25> 패시브하우스 박공벽 부위 모델 부재 별 열유속

부재	최고 열유속 (W/m^2)	최저 열유속 (W/m^2)	평균값 (W/m^2)	RMS값 (W/m^2)
실내표면 전체	69.29	3.87	10.35	13.66
지붕면 전체	69.29	4.06	10.62	15.38
지붕면 중심부	4.08	4.06	4.06	4.06
지붕면 교차부	69.29	8.12	16.88	22.48
박공벽/벽체면 전체	65.74	3.87	10.21	13.49
박공벽/벽체면 중심부	3.80	3.73	3.79	3.79
벽체-지붕 접합부	57.86	11.28	19.42	22.75
박공벽-지붕면 접합부	65.74	43.61	48.38	48.52

3.5 열 성능 평가 결과 검증

3.5.1. 전열해석 결과 검증 개요

본 연구에서 가정한 대상 신한옥은 표준 한옥 모델을 기반으로 한 가상의 건물이기 때문에 전열해석 결과의 최소한의 검증을 위해 지붕 내부의 구성이 거의 비슷한 신한옥을 대상으로 실측을 수행하였다. 실측 조건과 동일한 실내·외 조건에서 전열해석을 다시 한 번 실시하였으며, 주요 지점에서의 표면온도와 열유속을 이용하여 비교하였다.

실측 대상 신한옥은 서울 은평구에 위치한 신한옥으로, 전체적인 지붕의 구성은 전열해석 대상 모델과 비슷하지만, 지붕면에 240mm의 단열재가 시공된 전열해석 대상 모델과 달리 140mm의 단열재가 시공되었다는 차이가 있다. 이는 후에 보정하도록 하였다. 실측은 이른 봄인 2015년 3월 27일 오전 4시경 수행되었고, 이때의 외기 온도는 약 -1.3℃로 측정되었다. 정상상태 가정을 위해 지붕의 축열로 인한 오차를 제거하기 위하여 측정 전 약 12시간 정도 지속적으로 난방을 하였다. 또한 열류량계의 정확도 향상을 위해 실내에 추가적인 난방을 하여 최대한 실내·외 온도차를 크게 유지하였으며, 실내 온도를 약 29.0℃로 유지하였다.

표면온도는 열화상 카메라를 이용하여 측정하였다. 열화상 카메라는 촬영 대상의 표면에서 방사되는 복사열의 강도를 측정하여 시각적으로 표현하는 장비이다. 본 연구에서 사용한 열화상 카메라에 대한 자세한 사양은 <표 3.26>와 같다. 촬영한 이미지의 후처리 작업을 위해 사용한 입력 조건은 <표 3.27>과 같다.

<표 3.26> 열화상 카메라의 사양

모델명	FLIR T335	
해상도	320*240 pixel	
온도 측정 범위	-20 ℃ ~ +650 ℃	
온도 분해능	< 50mK NETD	
정확도	±2 %	
스펙트럼 범위	7.5 - 13 μm	

<표 3.27> 열화상 사진의 보정을 위한 입력 조건

대상물의 방사율	0.95
반사 온도	29.0 ℃
대기 온도	29.0 ℃
상대 습도	19.2 %
거리	1.0 m

주요 지점에서의 열유속은 열류량계를 이용하여 측정하였다. 열류량계는 벽체와 같은 부재에 추가적인 열저항체를 부착하여 이를 통한 열류를 계산하는 기기이다. 본 연구에서 사용한 휴대용 열류량계의 자세한 사양은 <표 3.28>과 같다.

현대 주택 및 패시브하우스 지붕 모델의 경우 별도의 실측을 통한 검증을 수행하지 않고, 전열해석 결과와 인용 문헌에서 제시하는 결과를 비교하는 방법으로 검증하였다. 참고문헌에서 제시하고 있는 현대 주택과 패시브하우스의 지붕면과 벽체면을 통한 열관류율은 <표 3.29>과 같이 요약할 수 있다.

<표 3.28> 휴대용 열류량계의 사양

모델명	Testo 435 U-value set	
측정 범위	-20 ℃ ~ +70 ℃	
정확도	Class 1 ±0.1 % / ±0.2 % of mV	
사용 조건	실내·외 온도차 20℃ 이상	

<표 3.29> 인용 자료에서 제시된 현대 주택과 패시브하우스의 열관류율

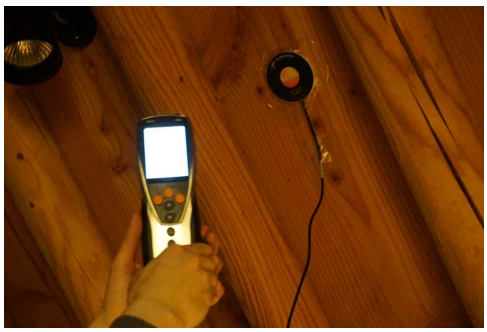
주택 유형	위치	열관류율 ($W/m^2 \cdot K$)
현대 주택	지붕면	0.144
	벽체(박공벽 포함)	0.143
패시브하우스	지붕면	0.135
	벽체(박공벽 포함)	0.121

3.5.2. 전열해석 결과 검증

가. 신한옥 지붕 모델

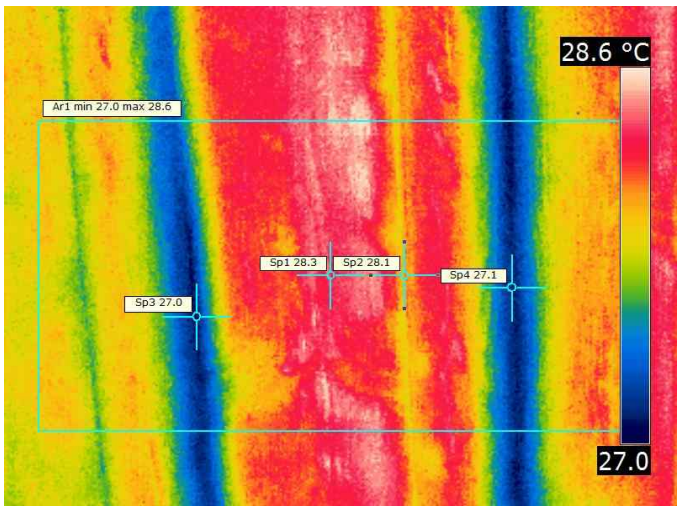
신한옥 지붕의 표면온도와 열류량 실측은 [그림 3.37]과 같이 수행되었다. 각각에 대하여 지붕면, 당골막이 부위, 박공벽 부위에 대하여 측정하였다. 열화상 카메라 촬영 시 조명에 의한 간섭 효과를 배제하기 위하여 소등한 상태로 측정하였다. 열화상 촬영에 따른 지붕면, 당골막이 부위, 박공벽 부위의 표면온도는 각각 [그림 3.38], [그림 3.39], [그림 3.40]와 같으며, 대표 온도를 함께 표현하였다. [그림

(a) 열화상 카메라

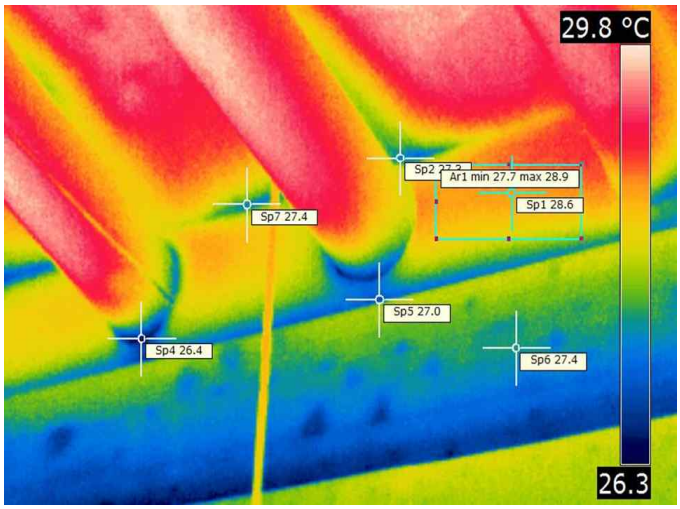


(b) 열류량계

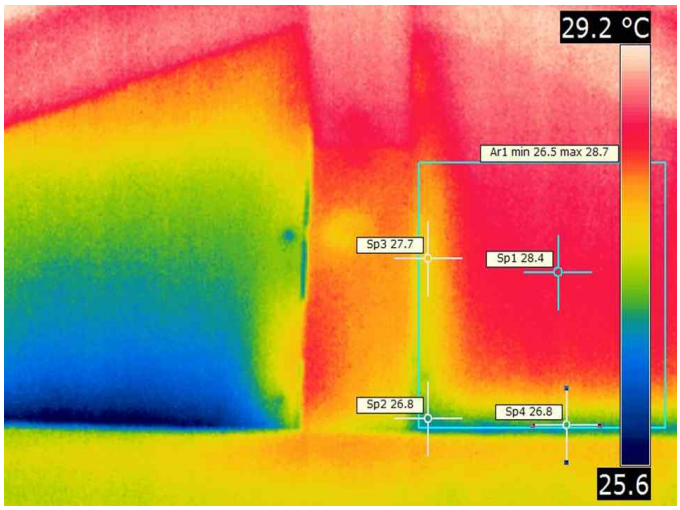
[그림 3.37] 표면온도 및 열유속 측정 방법



[그림 3.38] 지붕면 부위의 표면온도 측정 결과



[그림 3.39] 당골막이 부위의 표면온도 측정 결과



[그림 3.40] 박공벽 부위의 표면온도 측정 결과

3.39]의 경우, 박공벽의 좌측 벽면은 단열이 유난히 낮은 표면온도를 보인 것을 볼 때 단열이 올바르게 시공되지 않은 것으로 판단, 검증을 위한 결과에서 생략하였다.

측정 결과 지붕면의 평균 온도는 약 27.9℃, 최대 및 최소 온도는 각각 28.6℃와 27.0℃로 나타났다. 당골막이 부위의 평균, 최대 및 최소 온도는 각각 28.5℃, 28.9℃, 27.7℃로 나타났다. 마지막으로 박공벽의 평균, 최대 및 최소 온도는 각각

28.2℃, 28.7℃, 26.5℃로 나타났다. 실측 결과를 바탕으로 동일한 조건에서의 전열해석 결과를 비교하면 <표 3.30>와 같이 요약할 수 있다. 각각에 대하여 최대온도, 최소온도, 평균온도를 나타내었다. 평균온도의 경우 약 2% 내외의 적은 오차를 보임을 알 수 있었고, 지붕을 아주 작은 절점으로 나누어 계산하는 전열해석의 특성상 최소온도에서 더 낮은 온도를 보이는 것으로 판단된다. 또한, 지붕면의 경우 전열해석 대상 모델은 단열수준이 더욱 높을 것으로 예상되었으나, 실내 공기의 성층화 등의 이유로 실측 시 예상보다 높은 온도가 측정된 것으로 보인다.

실내 표면의 열유속도 전열해석 결과를 실측결과와 비교하였다. 열류량계의 특성상 비교적 평활하고 넓은 면에서 측정해야하기 때문에 열교 예상 부위는 제외하고, 일반 면 부위를 중심으로 측정하였다. 결과는 <표 3.31>과 같다.

<표 3.30> 신한옥 지붕의 부위 별 표면온도

부위		전열해석 결과 표면온도 (℃)	실측 결과 표면온도 (℃)	오차(%)
지붕면	최대	28.98	28.6	1.32
	최소	24.88	27.0	7.85
	평균	**28.64**	**27.9**	**2.65**
당골막이	최대	28.54	28.9	1.25
	최소	24.88	26.4	5.76
	평균	**27.67**	**28.0**	**1.18**
박공벽	최대	28.12	28.7	2.02
	최소	19.93	26.5	24.80
	평균	**27.67**	**28.2**	**1.88**

<표 3.31> 신한옥 지붕의 부위 별 표면 열유속

부위	전열해석 결과 열유속 (W/m^2)	실측 결과 열유속 (W/m^2)	오차(%)
지붕면	4.86	7.62	36.24
당골막이	5.70	6.02	5.30
박공벽	10.24	10.95	6.48

열유속의 실측에 따른 오차는 지붕면에서 약 36%를 제외하면 각각 5~6%로 두 결과가 비교적 비슷하게 나타난 것을 알 수 있다. 지붕면의 경우 전열해석 대상 모델은 240mm의 단열재가(도면 상 평균 두께 약 215mm), 실측 한옥은 140mm의 단열재가 시공되어 전체 열관류율 역시 두께의 비율과 비슷한 정도의 차이가 날 것으로 예상된다. 실측 결과인 7.62 W/m^{2}에 단열재 두께의 비율을 보정하면, 약 4.96 W/m^{2}로, 오차는 2% 정도로 감소한다. 따라서 전열해석 결과 비교적 정확한 계산이 된 것을 판단할 수 있다.

나. 현대 주택 및 패시브하우스 지붕 모델

<표 3.29>와 같이 현대 주택의 지붕과 벽체의 재료, 규격을 바탕으로 계산된 열관류율은 각각 0.144W/m^2·K, 0.143W/m^2·K이며, 패시브하우스의 지붕과 벽체의 계산된 열관류율은 각각 0.135W/m^2·K, 0.121W/m^2·K이다. 이는 지붕면-벽체면의 접합부 등 모서리 주위 발생하는 열교를 고려하지 않은 계산 값이며, 패시브하우스의 서까래에 의한 열손실은 1차원 열전달로 고려한 계산 값이다. 전열해석 결과는 일반 면 부위의 열유속을 이용하였다. 실내·외 온도 차 31.3℃를 이용하여 각각의 열관류율을 비교하면 <표 3.32>와 같다.

전열해석 결과와 자료에서 제시된 수계산 결과의 오차는 현대 주택의 지붕과 벽체에서 모두 0.00%, 패시브하우스의 지붕면에서는 약 6.67%, 벽체면에서는 약 0.83%로 나타났다. 패시브하우스 지붕의 경우, 제시된 자료에서는

<표 3.32> 현대 주택과 패시브하우스 지붕의 열관류율 비교

주택 유형		전열해석 결과		자료에서 제시된 열관류율 (W/m^2·K)	오차(%)
		열유속 (W/m^2)	열관류율 (W/m^2·K)		
현대 주택	지붕면	4.51	0.144	0.144	0.00
	벽체면	4.47	0.143	0.143	0.00
패시브하우스	지붕면	4.52	0.144	0.135	6.67
	벽체면	3.76	0.120	0.121	0.83

서까래와 단열재에 의한 열류를 각각의 면적비를 이용하여 계산하였으나, 실제로는 2차원의 열전달이 발생하는 부위이므로 전열해석 결과에서 더 정확한 값을 얻은 것으로 예상된다. 신한옥의 지붕과 마찬가지로 전열해석 결과 비교적 정확한 계산이 이루어졌음을 확인할 수 있다.

3.6 소결

본 장에서는 신한옥 지붕의 열 성능 평가를 위해 신한옥 지붕의 부위 별 열전달 특성을 정성적으로 분석하고, 이를 토대로 신한옥과 전통한옥, 현대 주택 및 패시브 하우스의 지붕에 대하여 전열해석을 실시하였다. 전열해석 결과는 비슷한 조건에서의 실측값 또는 문헌에서 제시하는 값과 비교하여 검증하였다. 본 장의 내용을 요약하면 다음과 같다.

1) 신한옥 지붕의 상세도면을 바탕으로 추가적인 열손실이 예상되어 전열해석 시 모델링에 포함하여야 하는 부위를 분석하였다. 지붕면에서 고려해야 하는 부위는 지붕면을 따라 발생하는 부재의 두께 변화와 단열재를 관통하는 서까래, 지붕틀 등 구조 부위로 판단되었다. 당골막이와 박공벽에서는 당골막이 상부의 개판, 당골막이의 단열재를 관통하는 서까래, 단열이 시공되지 않은 도리, 박공벽 상부 모서리의 개판, 박공벽 부위 내·외를 관통하는 대량, 판대공, 서까래 등 부위가 고려 대상에 포함되었다.

2) 전열해석을 위한 평가 도구로는 모델링 시 발생하는 부재 간 간섭, 좌표 변경 가능성, 격자 크기의 최적화 가능성, 이산화 방법 등을 고려하여 Solidworks Simulation을 선정하였다. 전열해석은 동계 정상상태 조건을 가정하였으며, 실내·외 온도 및 표면 열전달계수 등 입력조건은 선행 연구를

참조하여 선정하였다. 전열해석을 위해 신한옥, 전통한옥, 현대 주택 및 패시브하우스 사례를 선정하였다. 신한옥은 한옥 표준 모델을 이용하였고, 전통한옥은 신한옥과 동일한 형태에서 지붕 내부 구성을 바꾼 사례로 선정하였다. 현대 주택의 경우 농촌 주택 표준 설계도를 이용하였으며, 패시브하우스는 독일의 사례를 선정하였다. 각각의 지붕은 열전달 특성을 고려하여 지붕을 지붕면 부위 모델과 박공벽 부위 모델로 나누어 모델링하였다.

3) 전열해석은 네 가지 주택 형태에 대한 지붕면 부위 모델, 박공벽 부위 모델에 대해 수행되었다. 각 모델에 대한 전열해석 결과는 온도 분포 및 열유속 분포, 표면온도 데이터, 표면 열유속 데이터로 정리하였다. 온도와 열유속 분포를 바탕으로 주변보다 표면온도가 낮고 열유속이 크게 나타나는 열교 부위를 대략적으로 판단할 수 있다. 각각에 대한 정량적인 분석은 4장에서 수행된다.

4) 상용 프로그램을 활용한 전열해석 결과는 실측 결과와 인용 자료의 계산 값을 이용하여 검증하였다. 신한옥 지붕의 경우 지붕 내부의 구성이 거의 비슷한 신한옥을 대상으로 표면온도, 표면 열유속을 측정하여 이를 전열해석 결과와 비교하였다. 표면온도의 경우 약 1~2%, 표면 열유속의 경우 약 2~6%의 적은 오차를 보였다. 현대 주택과 패시브하우스의 지붕은 인용 자료에서 제시된 계산 값과 전열해석 결과를 비교하였으며, 약 0~4%의 오차를 보였다.

제 4 장 신한옥 지붕의 열 성능 분석 및 개선 방안

4.1 개요

본 장에서는 제 3장에서 제시된 열 성능 평가 결과를 바탕으로 각 주택 형태 별 지붕의 열 성능을 비교하고자 한다. 계산된 열유속을 바탕으로 열관류율을 계산하여 각각의 상대적인 열 성능 수준을 비교한다. 비교한 결과를 바탕으로 열 성능 차이의 원인을 분석하기 위해 신한옥과 다른 주택 형태의 지붕 부위 별 열손실을 보다 심층적으로 분석하였다. 신한옥 지붕에서 열교를 포함하여 열 성능이 저하되는 원인을 정리하여, 신한옥의 디자인을 그대로 유지하면서 열 성능을 개선할 수 있는 방안을 부위 별로 제시하였다.

4.2 신한옥 지붕의 열 성능 평가 결과 분석

4.2.1. 주택 형태 별 지붕의 실내 표면 온도 비교 분석

3장에서 계산한 네 가지 주택 형태에 대하여 지붕의 대략적인 열 성능 수준 비교가 가능하도록 각 모델 별 실내 표면온도를 비교하였다. 네 가지 주택 형태에 대한 8가지 모델은 모두 동일한 실내·외 경계조건 하에서 전열해석이 수행되었기 때문에 실내 표면온도가 높을수록 열 성능이 높은 것으로 판단할 수 있다. 각 주택 형태 별 실내 표면온도를 비교하면 <표 4.1>과 같다.

<표 4.1> 주택 유형 별 모델의 평균 실내 표면온도

주택 유형	평균 실내 표면 온도 (℃)	
	지붕면 부위 모델	박공벽 부위 모델
신한옥	19.09	18.36
전통한옥	18.04	15.7
현대 주택	19.34	19.07
패시브하우스	19.40	19.14

네 가지 주택 형태 모두 지붕면 부위 모델보다 박공벽 부위 모델에서 더 낮은 평균 실내 표면온도를 보였으며, 이는 박공벽 부위에서 더 많은 열손실이 발생하는 것으로 판단할 수 있다. 실내 표면온도는 열 성능이 낮은 전통한옥에서 가장 낮게 나타났으며, 신한옥은 현대 주택과 패시브하우스에 비해 다소 낮은 표면 온도를 보였다. 특히 지붕면 부위 모델에서보다 박공벽 부위 모델에서 그 차이가 더 큰 것을 확인할 수 있다. 현대 주택과 패시브하우스는 표면온도는 아주 적은 차이로 현대 주택이 패시브하우스에 비해 더 낮은 수준이다. 보다 정밀한 열 성능 비교를 위해서는 표면온도 분포에 대한 추가적인 분석이 필요할 것으로 판단된다.

실내 표면온도를 이용하여 열 성능을 확인하는 다른 방법으로는 TDR(온도차비율)에 의한 평가가 있다. TDR은 적외선 촬영 등의 결과인 표면온도만으로 열 성능을 판단하는데 이용되는 방법으로 식 (4.1)과 같이 계산된다. TDR 값이 작을수록 열 성능이 뛰어난 것으로 풀이된다.

$$TDR = \frac{T_i - T_{is}}{T_i - T_o} \tag{4.1}$$

여기서,

T_i : 실내 온도, ℃

T_{is} : 해당 지점의 실내 표면온도, ℃

T_o : 외기 온도, ℃

각 모델에서 계산된 평균 및 최소 실내 표면온도를 바탕으로 지붕과 부위에 따른 온도차비율을 비교하면, <표 4.2>와 같이 나타낼 수 있다.

<표 4.2> 주택 유형 별 모델의 온도차비율

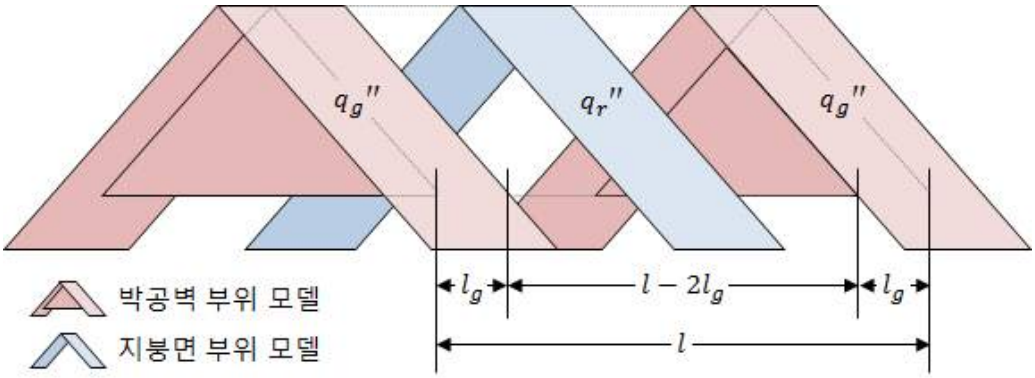
주택 유형	지붕면 부위 모델			박공벽 부위 모델		
	TDR (평균값)	TDR (최솟값)	차이	TDR (평균값)	TDR (최솟값)	차이
신한옥	0.03	0.24	0.21	0.05	0.30	0.25
전통한옥	0.06	0.29	0.23	0.14	0.43	0.29
현대 주택	0.02	0.09	0.07	0.03	0.15	0.12
패시브하우스	0.02	0.03	0.01	0.03	0.14	0.11

주택 형태에 따른 TDR의 평균값과 최솟값을 비교하면 그 차이가 확연히 나타나는 것을 확인할 수 있다. TDR의 평균값을 비교하면, 실내 표면온도만으로 비교한 결과와 마찬가지로 신한옥은 전통한옥에 비해서는 큰 차이로 낮은 값을 보이나, 현대 주택이나 패시브하우스에 비해서는 다소 높은 수준의 값을 보이는 것을 확인할 수 있다. 그러나 TDR의 최솟값을 비교하면 신한옥은 현대 주택이나 패시브하우스의 TDR 최솟값과 확연한 차이를 보인다. 오히려 전통한옥에 근접한 수준으로 신한옥의 TDR 최솟값은 증가하였다.

TDR의 평균값과 최솟값 간의 차이를 비교하면 신한옥 지붕에서의 표면 온도가 상대적으로 큰 온도차를 갖고 분포된 것을 쉽게 확인할 수 있다. 현대 주택과 패시브하우스의 TDR 차이는 약 0.01~0.1의 수준으로 심각한 온도차이가 발생하지는 않으나, 신한옥의 TDR 차이는 약 0.23~0.29의 수준으로 전통한옥과 비슷한 수준이었다. 모든 주택에서 부분적인 열 성능 저하가 발생하여 TDR 값의 차이는 발생하지만, 신한옥에서는 그 차이가 현대 주택이나 패시브하우스에 비해 훨씬 크게 발생하였다.

4.2.2. 주택 형태 별 지붕의 평균 열관류율 비교 분석

주택 형태별 지붕의 열 성능을 보다 정확하게 비교하기 위하여 지붕의 평균 열관류율을 계산하였다. 열관류율 계산 시 신한옥과 전통한옥의 지붕은 벽체



[그림 4.1] 지붕의 평균 열관류율 계산 방법

상부의 구조 부재인 도리를 지붕의 구성요소로 포함하였다. 현대 주택과 패시브하우스는 신한옥 및 전통한옥과 동등한 조건에서 비교가 되도록, 신한옥과 전통한옥과 비슷한 높이의 벽체까지 지붕에 포함하여 지붕의 평균 열관류율을 계산하였다.

평균 열관류율은 네 가지 주택 형태 모두 동일한 바닥 면적의 주택 규모로 가정하여, 지붕면 부위 모델과 박공벽 부위 모델의 계산 결과를 조합하였다. 바닥 면적은 一자형의 소형 주택을 가정하여, 신한옥을 기준으로 폭 1칸, 길이 4칸으로 설정하였다. 전통건축의 1칸에 대한 길이는 6자(약 1800mm)에서 12자(약 3600mm)로 다소 유연하게 정의되지만, 본 연구에서는 1칸을 3600mm로 정의하여 폭 3,600mm, 길이 14,400mm로 가정하였다.

가정한 바닥 면적의 소형 주택에 대한 지붕의 평균 열관류율은 [그림 4.1]의 개념과 같다. 一자형 주택의 길이방향 양 끝에 위치한 박공벽을 대표하는 박공벽 부위 모델과 그 사이의 지붕면을 대표하는 지붕면 부위 모델의 실내표면을 통한 평균 열유속을 각각의 면적 비(=길이 비)에 따라 가중평균을 구하면 식 (4.2)와 같이 계산할 수 있다. 지붕 전체 길이와 박공벽 부위 모델의 폭은 모두 중심선 길이로 계산하였다.

$$U = \frac{1}{\Delta T} \times \frac{q_g'' \times 2l_g + q_r'' \times (l - 2l_g)}{l} \qquad (4.2)$$

여기서,

U : 지붕 전체의 평균 열관류율, $W/m^2 \cdot K$

ΔT : 실내·외 온도차, ℃

q_r'' : 지붕면 부위 모델을 통한 평균 열유속, W/m^2

q_g'' : 박공벽 부위 모델을 통한 평균 열유속, W/m^2

l : 대상 주택의 지붕 전체 길이, m

l_g : 박공벽 부위 모델의 지붕 길이 방향 폭, m

네 가지 주택 형태에 대한 지붕의 평균 열유속과 각 모델의 길이 방향 폭, 그에 따른 평균 열관류율은 <표 4.3>과 같이 요약할 수 있다. 전열해석 시 입력조건에 따른 실내·외 온도차는 31.3℃로, 지붕의 전체 길이는 14,400mm로 계산하였다.

네 가지 주택 형태 모두 지붕면 부위 모델보다는 박공벽 부위 모델에서 더 큰 열유속이 발생하였다. 박공벽 부위 모델에 더 많은 접합 부위가 있어 열교가 많이 발생한 것으로 판단된다. 평균 열관류율은 전통한옥, 신한옥, 현대 주

<표 4.3> 주택 유형 별 지붕의 평균 열관류율

주택 유형	지붕면 부위 모델		박공벽 부위 모델		**평균 열관류율** (W/m²·K)
	평균 열유속 (W/m²)	모델 폭 (mm)	평균 열유속 (W/m²)	모델 폭 (mm)	
신한옥	9.36	900	20.13	510	**0.323**
전통한옥	37.90	900	51.15	510	**1.241**
현대 주택	7.12	800	11.26	586	**0.238**
패시브하우스	5.21	800	10.35	682.5	**0.182**

택, 패시브하우스의 순으로 높게 나타났다. 신한옥의 지붕의 열관류율은 0.323 W/m^2·K로 단열이 전혀 시공되지 않은 전통한옥 지붕의 1.241 W/m^2·K에 비해 약 26.03% 수준으로 열 성능이 상당한 수준으로 개선된 것을 확인하였다. 현대 주택, 패시브하우스의 열관류율에 비해서는 각각 135.71%, 177.47%로 단열이 강화된 현대 주택에 비해서는 열 성능이 낮은 것을 확인할 수 있었다.

열 성능의 저하가 발생하는 부위를 제외한 일반 면 부위에서의 열유속을 바탕으로 각각의 열관류율을 계산하면 <표 4.4>와 같다. 일반적으로 에너지절약설계기준 등의 관련 법령에서는 열교 부위를 제외한 일반 면 부위에서의 1차원적인 열관류율 계산결과를 이용하기 때문에 이 값을 바탕으로 열교를 제외한 각각의 열 성능을 비교할 수 있다. 신한옥과 현대주택, 패시브하우스의 일반 면 부위를 통한 열 성능은 모두 에너지절약설계기준에서 제시하는 0.18 W/m^2·K의 기준을 만족하였으며, 전통한옥은 이에 크게 떨어지는 값을 보였다. 신한옥 지붕에는 약 215mm, 현대 주택 지붕은 200mm, 패시브하우스의 지붕은 280mm의 단열재가 시공된 것을 감안하였을 때, 신한옥과 현대주택, 패시브하우스의 지붕에서 열교의 영향을 배제하면 대체로 비슷한 열 성능을 갖는 것을 확인할 수 있다.

<표 4.4> 주택 유형 별 지붕의 일반 면 부위에서의 열관류율

주택 유형	지붕면 부위 모델 계산 결과	
	일반 면 부위 열유속 (W/m^2)	열관류율 (W/m^2·K)
신한옥	4.90	0.157
전통한옥	34.66	1.11
현대 주택	4.51	0.144
패시브하우스	3.98	0.127
건축물의 에너지절약설계기준	-	0.180

다시 말해, 신한옥과 현대 주택, 패시브하우스 지붕의 일반 면 부위를 통한 열관류율은 비슷한 수준이나, 신한옥의 평균 열관류율은 현대 주택이나 패시브하우스에 비해 상대적으로 큰 차이를 보이며 높게 나타났다. 각각의 지붕에서 모두 열교가 발생하여 평균 열관류율은 저하되지만, 신한옥에서 열교에 의한 영향이 더 큰 것으로 해석할 수 있다. 이에 관한 자세한 분석 내용은 다음 장에서 서술하고자 한다.

4.2.3. 주택 형태 별 지붕의 열 성능에 대한 열교의 영향 분석

앞서 계산한 주택 형태 별 지붕의 열관류율 계산 결과를 볼 때, 일반 면 부위에서 계산한 열관류율보다 지붕 전체의 평균 열관류율이 더 높은 것을 확인할 수 있다. 지붕의 형태에 따라 그 양상이나 정도는 다르지만, 이 같은 현상은 열교 발생에 의해 지붕 전체의 열 성능이 저하된 것으로 판단할 수 있다. 주택 형태 별로 평균 열관류율과 일반 면 부위의 열관류율을 비교하여 열교에 의한 영향 정도를 비교하고 분석하고자 한다.

먼저 각각의 주택 형태에 대하여 지붕의 전체 열손실 중 열교로 인한 열손실이 차지하는 비율을 각각 계산하였다. 열교를 고려하지 않은 일반 면 부위에서의 평균 열유속과 열교에 의한 열손실이 반영된 전열해석 결과의 열유속의 차이를 비교하였다.

신한옥 지붕의 지붕면 부위 모델, 박공벽 부위 모델의 계산 결과를 이용하여 단열이 시공된 지붕면(개판)과 당골막이와 도리로 이루어진 벽체면, 박공벽의 전체와 중심부를 통한 열유속을 비교하면 <표 4.5>와 같다. 신한옥 지붕의 열교에 의한 열손실 비율은 약 25 ~ 74% 수준으로, 그 정도가 비교적 크게 나타났다. 열교 현상이 전혀 없는 이상적 경우에 비해 두 배 이상의 열손실이 발생하기도 하였다.

<표 4.5> 신한옥 지붕 주요 표면에서의 열유속 비교

표면 부위	지붕면 부위 모델 열유속 (W/m²)			박공벽 부위 모델 열유속 (W/m²)		
	열교 미반영	열교 반영	열교에 의한 열손실 비율(%)	열교 미반영	열교 반영	열교에 의한 열손실 비율(%)
지붕면(개판)	4.90	6.60	25.76	5.00	15.35	67.43
당골막이 +도리	5.63	19.58	71.25	5.64	21.83	74.16
박공벽 +대량/판대공	-	-	-	10.58	22.66	53.31

주요 표면 별로 심층적으로 분석하면, 지붕면의 경우, 지붕면 부위 모델과 박공벽 부위 모델 간 열손실 비율 차이가 확연하다. 지붕면 부위 모델에서는 열교에 의한 열손실 비율이 26%정도로 적은 편이지만, 박공벽 부위 모델에서는 약 67%로 높다. 지붕면과 박공벽의 접합부에서 박공벽 상부의 개판을 따라 발생하는 열교에 의한 열손실이 상당한 것으로 판단된다. 벽체면의 열손실 비율은 두 모델에서 거의 비슷한 수준으로 높았다. 당골막이 상·하부의 모서리, 서까래 관통부, 도리 등을 따라 상당히 많은 열손실이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 박공벽 또한 마찬가지 이유로 53% 수준의 비교적 높은 열손실 비율이 발생하는 것을 확인하였다.

전통한옥 지붕의 주요 표면에서의 열유속을 비교하면 <표 4.6>과 같다. 전통한옥 지붕의 경우 신한옥과는 다소 반대되는 결과를 보였다. 전통한옥에서

<표 4.6> 전통한옥 지붕 주요 표면에서 열유속 비교

표면 부위	지붕면 부위 모델 열유속 (W/m²)			박공벽 부위 모델 열유속 (W/m²)		
	중심부	전체	열손실 증가율(%)	중심부	전체	열손실 증가율(%)
지붕면(개판)	34.66	37.27	6.85	35.68	48.60	26.58
당골막이 +도리	70.42	40.82	-72.51	70.81	45.28	-56.38
박공벽 +대량/판대공	-	-	-	83.08	75.31	-10.32

도 모서리 부위에서는 구조적인 이유로 열교가 발생할 수는 있으나, 중심 부위에서의 열 성능이 워낙 낮아 그 차이가 단열이 강화된 신한옥에 비해 현저히 낮은 수준임을 알 수 있다. 전통한옥 지붕에서는 열교가 거의 발생하지 않았기 때문에 신한옥 지붕과 달리 열교라는 용어가 아닌 열손실 증가율이라는 용어를 이용하여 열손실량을 비교하였다.

전통한옥의 지붕면에서는 모서리 부위에서 발생하는 열교에 의해 약 6~27%의 열손실 증가가 발생하였다. 단열이 시공되어 있지는 않지만 지붕면 상·하부의 모서리 등의 부위에서는 열이 빠져나갈 수 있는 면적이 일반 면 부위에 비해 더 많으므로 열교가 발생한 것으로 판단된다. 전통한옥 지붕의 당골막이와 도리, 박공벽 부위에서는 전체를 통한 열손실에 비해 중심 부위를 통한 열손실이 더 많아 열손실이 오히려 감소하는 꼴이 나타난다. 흙보다 열전도율이 낮은 목재로 이루어진 도리, 개판, 대량 및 판대공 등이 상·하부에 위치하여 일반 면에 비해 열손실이 줄었을 것으로 판단된다. 신한옥과 달리 전통한옥의 지붕에서는 신한옥 지붕에서 열교로 작용한 목재가 단열 역할을 하여 전체적인 열 성능에 도움이 되는 것을 확인할 수 있었다.

현대 주택의 주요 표면에서의 열유속을 비교한 결과는 <표 4.7>과 같다. 현대 주택의 경우 지붕면에 비해 벽체면에서 열교에 의한 열손실이 두드러지게 높게 나타났다. 이 같은 차이의 가장 근본적인 이유는 모델링 시 벽체 전체가 아닌 벽체 상부의 일부분만을 모델링하였기 때문으로, 지붕면과 달리 면적의

<표 4.7> 현대 주택 지붕 주요 표면에서의 열유속 비교

표면 부위	지붕면 부위 모델 열유속(W/m^2)			박공벽 부위 모델 열유속(W/m^2)		
	열교 미반영	열교 반영	열교에 의한 열손실 비율(%)	열교 미반영	열교 반영	열교에 의한 열손실 비율(%)
지붕면	4.51	4.95	8.89	4.48	6.95	35.54
벽체/박공벽면	4.47	16.53	72.96	4.61	13.53	65.93

대부분이 열교에 의한 열손실이 발생하는 부위이기 때문으로 판단된다. 그러나 본 논문에서는 지붕과 접합한 벽체면 또한 지붕의 일부로 포함하였기 때문에 그 결과를 그대로 분석에 이용하였다. 또한 벽체면과 박공벽면은 그 구성이 동일하기 때문에 별도의 표면으로 분리하지 않고 동일하게 분석하였다.

[그림 3.29] 또는 [그림 3.31]에서 확인할 수 있듯이, 현대 주택 지붕의 지붕면에서는 지붕면 상부에서는 비교적 안정적인 열류 패턴을 보이지만, 벽체면과 박공벽면의 상부를 따라 상당한 열류가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그 결과 지붕면의 열교에 의한 열손실 비율은 약 9 ~ 36% 수준이나, 벽체면에서는 약 66 ~ 72% 수준임을 확인할 수 있다. 지붕면의 내단열과 벽체 및 박공벽면의 외단열 사이에서 콘크리트 구조체에 의해 단열이 끊어짐으로서 발생하는 열교로, 현대 주택 열 성능에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

마지막으로 패시브하우스의 주요 표면의 열유속은 <표 4.8>과 같이 정리하였다. 패시브하우스의 지붕에서도 지붕면 부위 모델보다 접합부위가 많은 박공벽 부위 모델에서 더 큰 열손실 비율을 보였다. 패시브하우스의 열교에 의한 열손실 비율은 약 21 ~ 63% 수준으로 신한옥 지붕과 비슷한 수준이었다. 패시브하우스의 경우 단열재의 두께가 다른 주택 형태에 비해 두껍기 때문에 전체적 열 성능은 가장 좋게 나타났지만, 서까래가 단열재를 관통하면서 발생한 열교에 의해 비교적 많은 열손실이 발생한 것으로 예상된다.

열교에 의한 열손실 비율은 해당 주택 지붕의 열 성능과 비례하거나 반비례하는 관계를 갖지는 않는다. 그러나 일반적으로 일반 면 부위에서의 단열 수

<표 4.8> 패시브하우스 지붕 주요 표면에서의 열유속 비교

표면 부위	지붕면 부위 모델 열유속(W/m^2)			박공벽 부위 모델 열유속(W/m^2)		
	열교 미반영	열교 반영	열교에 의한 열손실 비율(%)	열교 미반영	열교 반영	열교에 의한 열손실 비율(%)
지붕면	3.98	5.04	21.03	4.06	10.62	61.77
벽체/박공벽면	3.76	6.00	37.33	3.79	10.21	62.87

<표 4.9> 주택 유형 별 지붕의 주요 표면에서의 열교에 의한 열손실 비율 비교

주택 유형	지붕면 부위 모델		박공벽 부위 모델		
	지붕면	벽체면 (당골막이 +도리)	지붕면	벽체면 (당골막이 +도리)	박공벽면 (박공벽 +대향/판대공)
신한옥	25.78	71.25	67.43	74.16	53.31
전통한옥	6.85	-72.51	26.58	-56.38	-10.32
현대 주택	8.89	72.96	35.54	65.93	65.93
패시브하우스	21.03	37.33	61.77	62.87	62.87

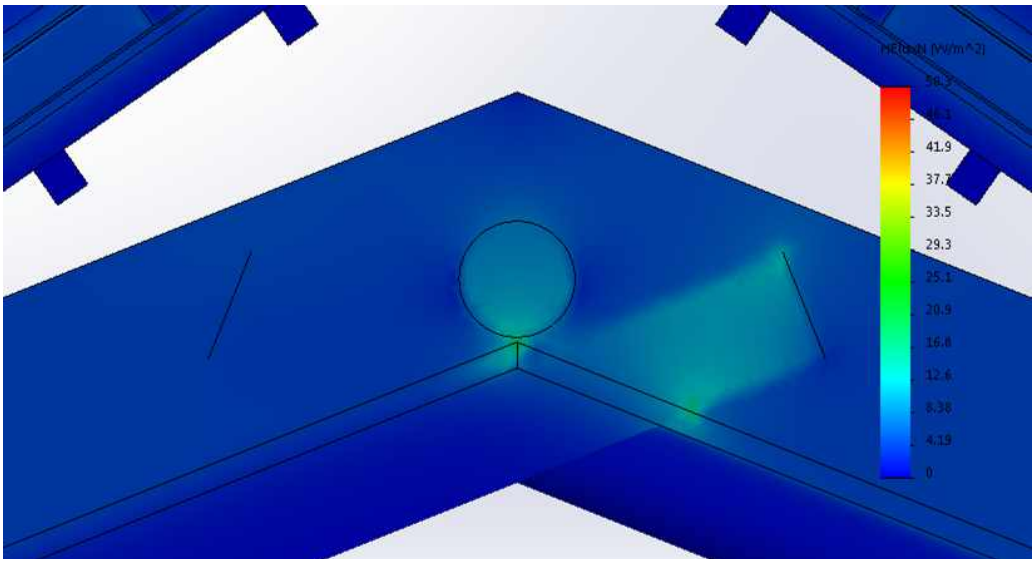
준이 높을수록 전체 열손실 중 열교에 의한 열손실의 비율은 증가한다. 다시 말해, 열교에 의한 열손실이 동일한 수준이라면, 열 성능이 가장 높은 패시브하우스부터 현대 주택, 신한옥, 전통한옥 순으로 열교에 의한 열손실 비율이 높게 나타나야 한다. 그러나 <표 4.9>에서 확인할 수 있듯이 신한옥 지붕에서의 열손실 비율이 대체로 가장 높은 수준임을 확인할 수 있다. 신한옥 지붕은 단열 수준에 비해서도 열교에 의한 열손실 비율이 높아 현대 주택이나 패시브하우스에 비해 열 성능이 더 낮아진 것으로 확인되었다. 신한옥 지붕에서 발생하는 열 성능 저하 원인, 즉 열교에 의한 열손실 증가는 다음 장에서 부위별로 자세히 분석하도록 한다.

4.2.4. 신한옥 지붕의 열교 발생 부위 분석

3장에서 계산된 신한옥 지붕의 온도 분포 및 열유속 분포를 바탕으로 부위별 열 성능 저하의 원인을 보다 심층적으로 분석하였다. 3.2장의 정성적 분석 결과 추가적 열손실이 예상되는 부위와 3.4장의 계산 결과 열교 발생 부위가 대체로 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 부위 별 열손실 양상과 그 원인을 지붕면 상부, 지붕면 중심부, 지붕면 하부 및 당골막이 부위, 박공벽 부위 등으로 나누어 분석하였다.

가. 지붕면 상부

지붕면 상부에서 가장 먼저 확인할 수 있는 열교 부위는 서까래와 적심도리에 의한 단열재 관통 부위이다. [그림 4.2]와 같이 서까래와 적심도리 부위에서 주변 단열재를 통한 열유속보다 더 많은 열유속이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 지붕면 부위 모델을 살펴보면, 개판 중심부의 열유속 평균은 4.90 W/m^{2}인데 반해, 개판을 관통하는 서까래의 둘레, 개판 상부의 모서리 부위에서는 각각 최대 10.02 W/m^2, 16.40 W/m^{2}의 열유속이 발생한다. 일반 면 부위에 비해 최대 약 2~3.3배의 열손실이 발생하였다. 특히 동일한 부위인 지



[그림 4.2] 신한옥 지붕의 지붕면 상부에서 발생하는 열유속 분포

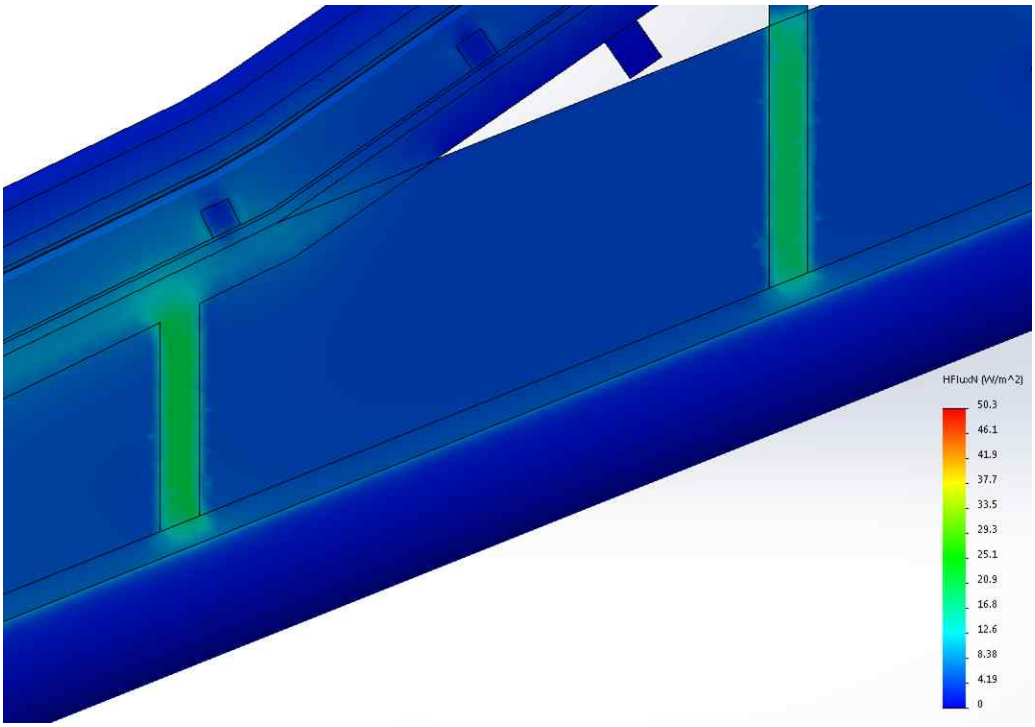
<표 4.10> 주택 유형 별 지붕면 상부 모서리의 열유속 비교

주택 유형	지붕면 부위 모델 영유속 (W/m^2)	박공벽 부위 모델 열유속 (W/m^2)
신한옥	16.40	31.05
전통한옥	41.69	56.00
현대 주택	6.42	8.56
패시브하우스	9.38	16.88

붕면의 교차부 모서리에서 발생하는 열유속 평균값을 비교하면, <표 4.10>과 같이 전통한옥을 제외하면 신한옥에서 열교가 가장 심하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 신한옥 지붕의 개판 상부 모서리는 서까래와 적심도리에 의한 단열재 관통에 따른 열 성능 저하가 합쳐지는 부위로, 구조적인 열교만 발생하는 현대 주택이나 서까래에 의한 약간의 열교만 발생하는 패시브하우스에 비해 더 많은 열교가 발생한 것으로 판단된다.

나. 지붕면 중심부

지붕면 중심부에서는 지붕틀이 지붕면의 단열재를 관통하면서 열교가 발생한다. [그림 4.3]과 같이 지붕틀은 그 두께는 얇지만, 단열재를 처음부터 끝까지 관통하기 때문에 주위에 비해 비교적 많은 열유속이 발생한다. 지붕틀

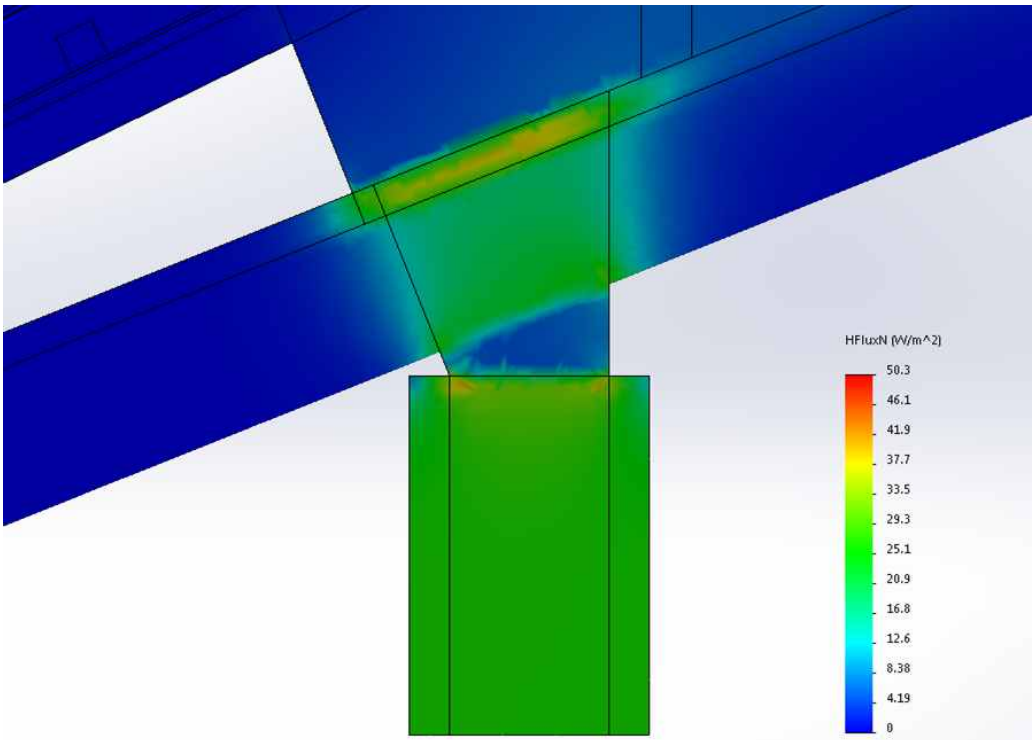


[그림 4.3] 신한옥 지붕의 지붕면 중심부에서 발생하는 열유속 분포

하부 표면을 따라 발생하는 열유속은 최대 8.67 W/m^{2}로, 열교가 없는 개판 중심부의 4.90 W/m^{2}에 비해 약 1.8배의 열손실이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

다. 지붕면 하부 및 당골막이 부위

지붕면 하부에서 지붕면과 당골막이가 접하는 부위, 서까래에 의해 당골막이가 관통하는 부위, 도리 등은 신한옥 지붕의 대표적인 열교 발생 부위이다. [그림 4.4]에서 확인할 수 있듯이 다양한 패턴의 열교가 발생한다. 가장 먼저, 지붕면과 당골막이의 두 단열재 사이에 위치한 개판을 따라 가장 큰 열유속이 발생하는 것을 알 수 있다. 지붕면 부위 모델에서 당골막이 상부 모서리에서의 평균 열유속은 40.33 W/m^{2}로, 당골막이 중심부의 5.63 W/m^{2}에 비해



[그림 4.4] 신한옥 지붕의 당골막이 부위에서 발생하는 열유속 분포

<표 4.11> 주택 유형 별 벽체-지붕 접합부 모서리의 열유속 비교

주택 유형	지붕면 부위 모델 영유속 (W/m^2)	박공벽 부위 모델 열유속 (W/m^2)
신한옥	40.33	44.61
전통한옥	70.42	81.33
현대 주택	25.93	29.32
패시브하우스	11.45	19.42

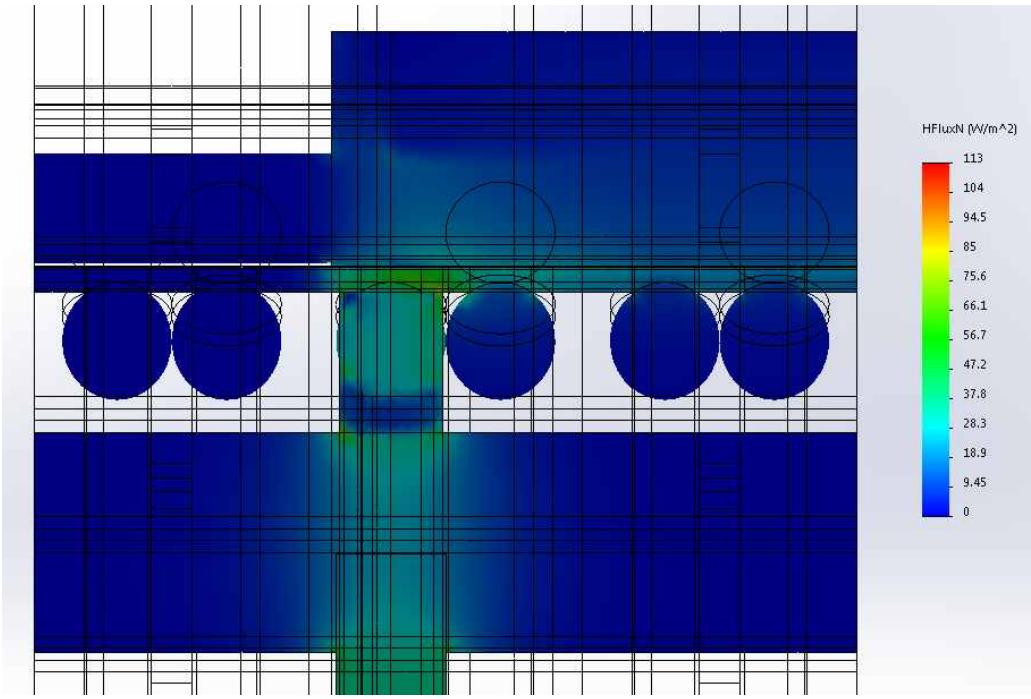
최대 약 7.2배에 달하는 열유속이 발생한 것을 확인할 수 있다. 지붕면 상부의 교차부위와 마찬가지로 동일한 부위인 벽체와 지붕 접합부에서의 열유속을 주택 형태별로 비교하면 <표 4.11>과 같다. 전통한옥을 제외하면 신한옥에서 압도적으로 많은 열유속이 발생하였다. 개판의 두께는 25mm로 아주 얇은 부재이지만, 개판에 의해 단열재가 불연속함에 따라 발생하는 열교는 상당한 것을 알 수 있다.

다음으로 서까래에 의한 당골막이 단열재의 관통 부위가 있다. 단열재에 비해 열전도율이 높은 목재인 서까래를 따라서 열교가 발생하는 부위이다. 당골막이 상부의 개판보다는 상대적으로 적은 열유속이지만, 당골막이 주위의 서까래 둘레를 따라서 지붕면 부위 모델을 기준으로 25.93 W/m^2의 열유속이 발생한다. 이는 당골막이 중심부에 비해 약 4.6배의 열유속으로 해당 부위를 통해서도 무시할 수 없는 양의 열교가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

마지막으로 당골막이 하부에 위치한 도리를 통한 열손실이 발생함을 알 수 있다. 도리는 한옥의 지붕 구조를 떠받치기 위한 구조부재로, 별도의 단열조치가 없다. 따라서 주변의 단열 부위에 비해 더 큰 열손실이 발생하며, 지붕면 전체로 보았을 때는 열교 부위로 작용한다. 지붕면 부위 모델을 기준으로 해당 부위의 평균 열유속은 24.39 W/m^2로 당골막이 중심부에 비해 약 4.3배의 열유속이 발생함을 확인하였다. 지붕면 하부와 당골막이 주위에서 발생하는 열교는 지붕면 상부 또는 지붕면 중심부에 비해 훨씬 큰 것으로 판단되었다.

라. 박공벽 부위

박공벽 부위는 크게 두 가지의 열교 발생 원인이 존재한다. 먼저 당골막이 상부의 개판에 의한 열교와 동일한 원인으로, 지붕면과 박공벽의 접합부에서 개판에 의해 단열재가 불연속하여 발생하는 열교가 있다. [그림 4.5]와 같이 박공벽 상부에 있는 개판을 따라서 박공벽면이나 지붕면에 비해 더 큰 열유속이 발생한다. 박공벽의 모서리를 따라서는 45.74 W/m^{2}의 열유속이 발생한다. 이는 박공벽 중심부의 열유속 10.58 W/m^{2}에 비해 약 4.3배에 해당하는 양으



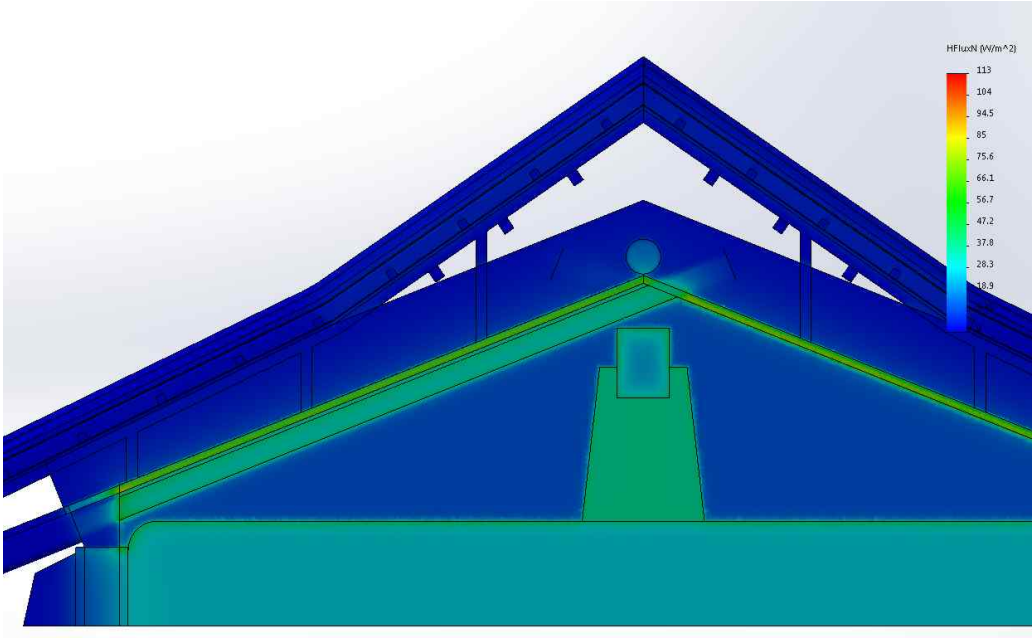
[그림 4.5] 신한옥 지붕의 지붕면-박공벽 접합 부위에서 발생하는 열유속 분포

<표 4.12> 주택 유형 별 지붕면-박공벽 접합부 모서리의 열유속 비교

주택 유형	박공벽 부위 모델 열유속 (W/m^2)
신한옥	45.74
전통한옥	88.47
현대 주택	39.45
패시브하우스	48.38

로 역시 상당한 열교가 발생한 것을 확인할 수 있다. 다른 주택 지붕에서 동일한 부위인 지붕면과 박공벽의 접합부 모서리에서의 열유속을 비교하면 <표 4.12>와 같다. 해당 부위는 모든 주택 형태에서 비교적 큰 열유속이 발생하는 부위로, 패시브하우스에서도 박공벽 상부에 시공된 서까래에 의해 상당한 열교가 발생하였고, 현대 주택에서도 그 양이 상당함을 알 수 있다. 신한옥도 패시브하우스보다는 아주 근소하게 적은 열유속을 보이며, 현대 주택에 비해서는 더 큰 열유속을 갖는 것으로 보아 해당 부위의 열교 역시 상당한 것을 확인하였다.

개판에 의한 단열재 불연속 부위 외에도 박공벽을 관통하여 시공된 대량, 판대공, 서까래는 박공벽 부위에서의 주요 열교 발생 원인이다. 당골막이 부위의 도리와 거의 비슷한 원인으로, 박공벽의 단열재에 비해 열전도율이 높은 목재 주위로 별도의 단열 조치가 없어 발생하는 열교이다. 해당 부위를 따라 발생하는 열유속 분포는 [그림 4.6]과 같다. 대량과 판대공을 따라 발생하는



[그림 4.6] 신한옥 지붕의 박공벽 부위에서 발생하는 열유속 분포

열유속은 26.29 W/m^2, 서까래를 따라 발생하는 열유속은 32.70 W/m^2, 또한 서까래의 모서리를 따라 발생하는 열유속은 34.26 W/m^{2}으로, 박공벽 중심부에 비해 각각 2.5배, 3.1배, 3.2배의 열유속이 발생하였다.

앞서 분석한 내용을 요약하여 <표 4.13>에 정리하였다. 신한옥 지붕에서 발생하는 모든 열교 부위에 대하여, 열교가 없는 중심부와 열교가 최대인 모서리 부위의 열유속을 비교하면, 최소 1.8배에서 최대 7.2배의 열유속 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 해당 부위에서의 열 성능을 개선하여 열손실을 감소시키면 신한옥 지붕도 상당한 열 성능 향상이 가능할 것으로 예상된다.

<표 4.13> 신한옥 지붕의 열교 미발생 부위와 최대 발생 부위의 열유속 비교

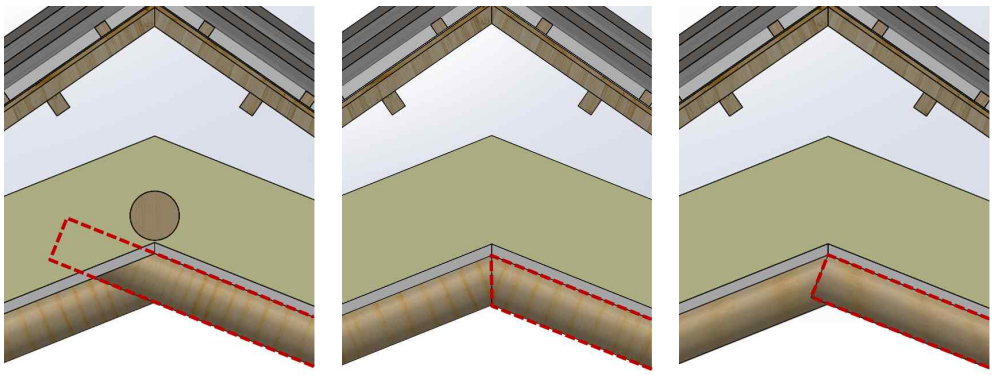
열교 발생 부위		열교 미발생 부위 (W/m^2)	열교 최대 발생 부위 (W/m^2)	차이
지붕면	개판-서까래 둘레	4.90	10.02	2.0배
	개판 상부 모서리		16.40	3.3배
	지붕틀 하부		8.67	1.8배
당골막이	당골막이 상부 모서리	5.63	40.33	7.2배
	당골막이-서까래 둘레		25.93	4.6배
	당골막이 하부 모서리		24.39	4.3배
박공벽	지붕면-박공벽 접합부	10.58	45.74	4.3배
	대량 및 판대공		26.29	2.5배
	서까래 (박공벽 관통)		32.70	3.1배
	서까래 모서리		34.26	3.2배

4.3 신한옥 지붕의 부위 별 열 성능 개선 방안

4.2.4장에서 분석한 내용을 바탕으로 신한옥 지붕의 열교 부위에서 취할 수 있는 단열 조치의 가능한 예시를 제시하여, 단열 시공의 방향성을 제시하였다. 부위 별로 제시되는 단열 시공의 예시는 현실적인 시공 가능성을 고려하였다. 모든 부위에서 단열 시공 방법이 제시한 후, 이를 종합하여 열 성능 개선 전과 개선 후의 열 성능을 비교하였다.

4.3.1. 신한옥 지붕 상부의 열 성능 개선 방안

4.2.4장에서 분석한 바와 같이 신한옥 지붕 상부에서 열교의 원인이 되는 부재는 단열재를 일부 관통하는 서까래와 적심도리이다. 이에 대한 단열 개선 방안으로는 서까래가 단열재를 관통하지 않도록 하는 것으로 [그림 4.7]과 같이 두 가지 방법을 제시할 수 있다. 서까래를 X자 형태로 교차시키지 않고 일치시키는 방법과 교차한 형태를 그대로 유지하되, 서까래가 개판과 단열재를 관통하지 않고 개판 하부에서 완료되도록 시공하는 방법이 있다. 이 경우, 서까래의 교차 지점에서 서까래의 기울기를 일정하게 유지시키기 위한 역할의 적심도리도 자연스럽게 생략할 수 있게



(a) 기존 사례 (b) 개선 방안 1 - 서까래 일치 (c) 개선 방안 2 - 서까래 일부 교차

[그림 4.7] 신한옥 지붕 상부에서의 단열 개선 방안

(a) 개선 방안이 적용되지 않은 사례

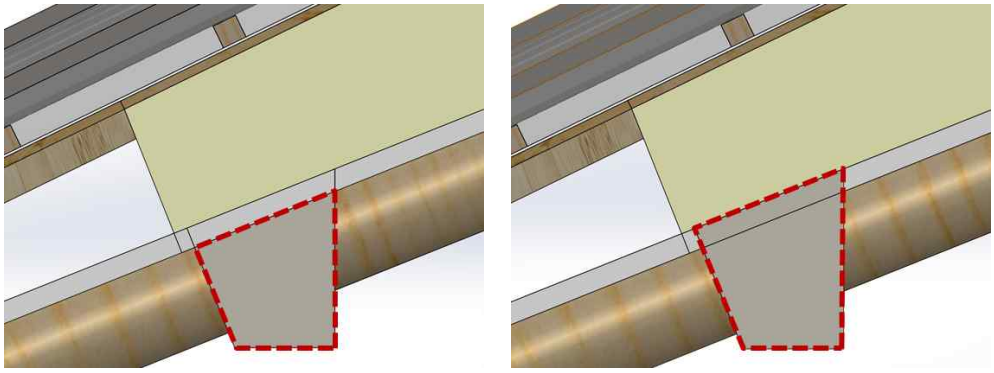
(b) 개선 방안 2를 적용한 사례

[그림 4.8] 신한옥 지붕 상부의 서까래 시공 방법 실제 사례

되어 열교를 발생시키는 두 부재를 제거할 수 있는 이점이 있다. 시공 시 서까래의 기울기를 일정하게 유지시키는 것이 다소 까다로울 수 있으나, 신한옥의 서까래는 규격화되어 형태가 거의 일정하므로 이와 같은 서까래 시공 방법은 [그림 4.8]에서 비교한 것과 같이 실제로도 많이 적용되고 있는 방법이다.

4.3.2. 신한옥 지붕 하부 및 당골막이 부위의 열 성능 개선 방안

당골막이 부위에서는 크게 세 가지 열교 부위를 확인하였다. 가장 열교가 심하게 나타난 부위는 당골막이와 개판이 접합하는 부위에서의 개판에 의한 단열재 불연속 부위였다. 서까래 상부에 면 부재를 시공하기 위한 기초판 역할을 하는 개판에 의해 불가피하게 발생하는 열교인데, [그림 4.9]와 같이 열교가 발생하는 부위까지 당골막이의 단열재를 올려 시공한다면 이를 해결할 수 있다. 시공 과정에서 개판은 서까래에 고정되는 부재이기 때문에, 실내에 시공되는 개판과 실외에 시공되는 개판을 분리하여 서까래에 고정하고, 당골막이의 단열재는 기존보다 개판 두께만큼 높게 제작하여 시공한다면 아무 제약 없이 시공이 가능하다. 개판과 당골막이 단열재가 만나는 접합면에서 이격이 발생하는 문제가 발생할 수 있으나, 해당 부위에 채움 부



(a) 기존 사례

(b) 개선 방안
- 당골막이 단열재를 높여 시공

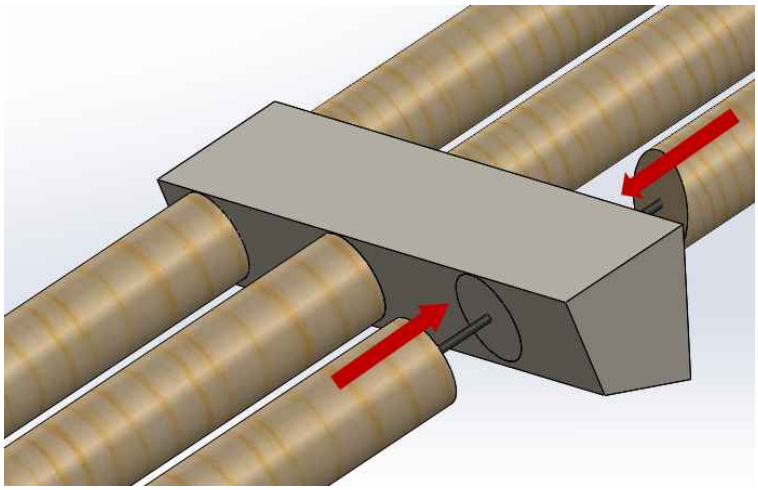
[그림 4.9] 신한옥 지붕의 지붕-벽체 접합부의 단열 개선 방안

재를 적절하게 시공하면 이는 쉽게 해결할 수 있을 것으로 예상된다.

당골막이 부위에서 발생하는 두 번째 열교 부위는 당골막이를 관통하는 서까래 부위이다. 앞서 제시된 지붕-벽체 접합부의 개판은 서까래에 고정되는 것이기 때문에 실내와 실외 부재로 분리하고, 그 사이를 단열재로 채우는 것이 가능하였으나, 서까래는 상부의 하중을 도리로 전달시키기 위한 구조 부재이기 때문에 이를 분리하는 것이 쉽지 않다. 그러나 기술적으로 완전히 불가능한 것은 아니다. 해당 부위

[그림 4.10] 캔틸레버 부위의 열교 방지를 위한
단열재 시제품 사례[26)]

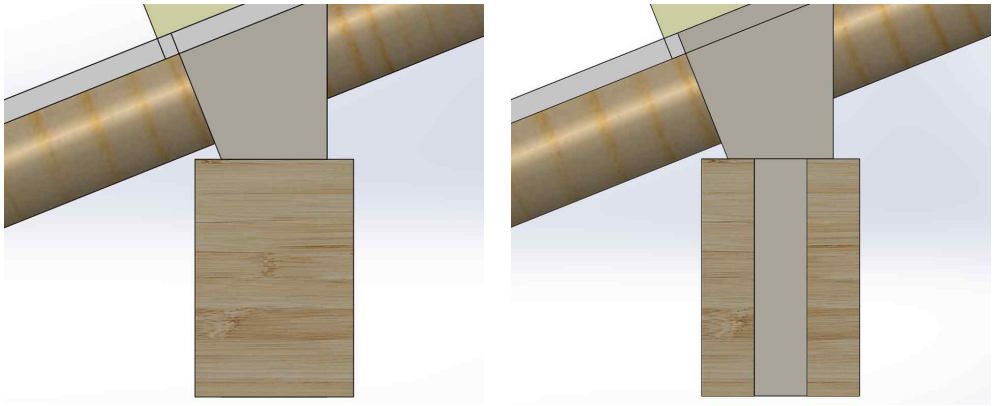
26) http://www.schoeck.com/cache/schoeckmedia_Image_Isokorb_K_US_1467x850px_rgb_72%5B8494%5D_schoeckmedia_image_thumbnailscheme_1280x1900.jpg (Schoeck사 제품 소개)



[그림 4.11] 신한옥 지붕의 당골막이 부위의 단열 개선 방안

는 현대 건축물의 발코니 공간 확보 등을 위한 캔틸레버 보와 유사한 열교 양상을 보인다. 시중에는 [그림 4.10]과 같이 해당 부위의 열교를 막기 위한 제품이 존재한다. 단열이 불연속되는 주요 구조 부위에서 철근 등을 보강한 고강도의 단열재를 적용하여 구조적인 역할과 동시에 단열의 역할을 할 수 있도록 제작된 제품이다. 동일한 원리를 서까래에 적용한다면 열교 현상을 효과적으로 막을 것으로 예상된다. [그림 4.11]과 같이 고강도의 단열재로 구성되면서 이형철근 등이 일체화된 당골막이용 서까래 제품이 제작된다면, 해당 제품의 실내·외로 서까래를 끼우거나 고정하는 등의 방법으로 단열 조치를 취할 수 있다.

당골막이 부위에서 발생하는 마지막 열교 부위는 도리 부위이다. 도리는 기본적으로 서까래를 떠받치기 위한 구조 부재이다. 이와 동시에 도리는 한옥의 외관을 결정하는 중요한 요소이기 때문에 실내·외에서 노출되어야 한다. 따라서 도리의 단열을 위해 도리의 외부에 단열재를 시공하는 방법은 단열재가 연속되기도 힘들뿐만 아니라 도리가 가려진다는 제약이 따르므로 적절한 방안으로 제시되기 어렵다. 도리를 실내·외 양측에서 노출시키면서 당골막이 단열재, 도리 하부 벽체의 단열재와 일치하는 단열재를 시공하기 위해서는 도리 내부에 단열재를 삽입해야 한다. 별도



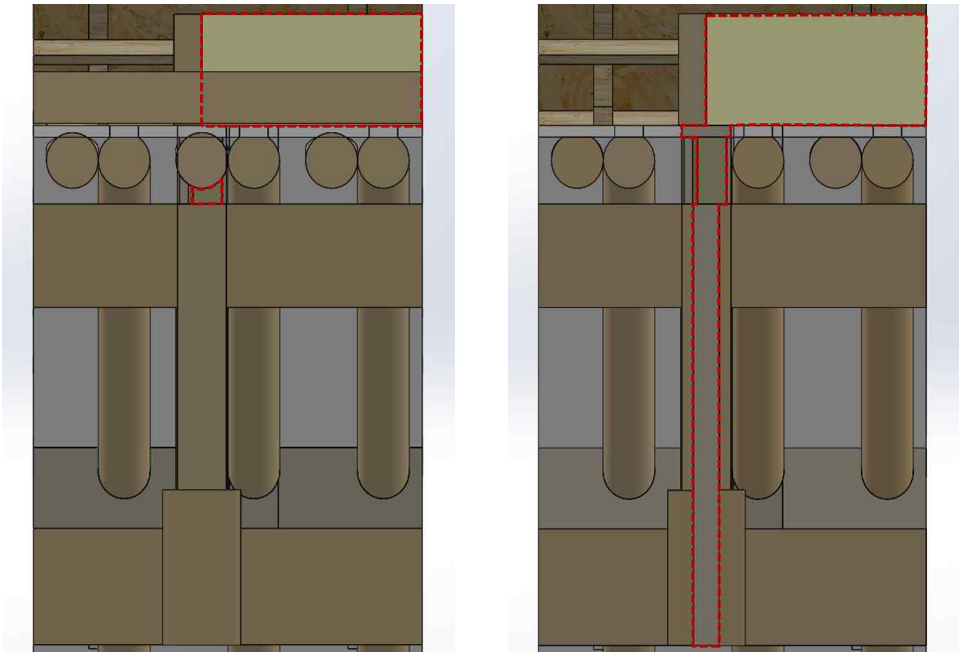
(a) 기존 사례 (b) 개선 방안 - 도리 내부 단열

[그림 4.12] 신한옥 지붕의 도리 부위의 단열 개선 방안

의 구조적인 계산이 필요하지만, 도리의 단면 치수를 적절히 조절하면, 도리 내부에 단열재를 삽입할 공간을 확보할 수 있을 것으로 판단되며, 이에 대한 개념은 [그림 4.12]와 같다. 도리 내부에 확보할 수 있는 공간의 두께는 제한적이기 때문에 해당 부위에서 완전한 단열을 기대하기는 어려울 것으로 예상되지만 최소한의 단열은 가능할 것으로 판단된다.

4.3.3. 신한옥 지붕의 박공벽 부위의 열 성능 개선 방안

박공벽 부위에서는 크게 두 가지 형태의 열교가 발생하지만, 그 원인은 앞서 제시된 열교 부위와 비슷하기 때문에 개선 방안 또한 앞서 제시된 방안을 응용할 수 있다. 먼저, 지붕면과 박공벽이 만나는 지점에서 개판에 의해 단열재가 불연속해 발생하는 열교는 4.3.1의 개판 사례와 동일하게 개선할 수 있다. 개판 중 박공벽 상부에 위치한 개판을 단열재로 치환하여 지붕면 상부의 단열재와 박공벽의 단열재가 연속할 수 있도록 하는 방법이다. 대량 및 판대공 등에서 발생하는 열교도 4.3.2의 도리 부위와 거의 동일한 것으로 생각할 수 있다. 마찬가지로 구조적인 계산이 선행된 후 부재 내부에 단열재가 시공될 수 있는 공간을 확보한 뒤, 단열재가 연속되도록 부재



(a) 기존 사례

(b) 개선 방안
- 박공벽 내부 단열 연결

[그림 4.13] 신한옥 지붕의 박공벽 부위의 단열 개선 방안

내부에 시공하는 것이다. 또한 박공벽을 관통하는 서까래는 구조적으로 중요한 역할을 하는 부재는 아니기 때문에 제거하여 박공벽에 간섭하지 않도록 하는 방안이 제시될 수 있다. 이러한 방안을 모두 적용하면 [그림 4.13]과 같이 박공벽 단면을 나타낼 수 있다. 기존 사례와 달리 개판의 일부를 단열재로 치환하고, 서까래를 제거하였으며, 대량과 판대공 내부에 단열재가 시공될 수 있는 공간을 확보하여 단열재를 삽입하였다. 비록 얇은 두께의 단열이 추가되지만 전체 단면에서 단열이 연속되어 상당한 열 성능의 개선이 이루어질 수 있을 것으로 판단된다.

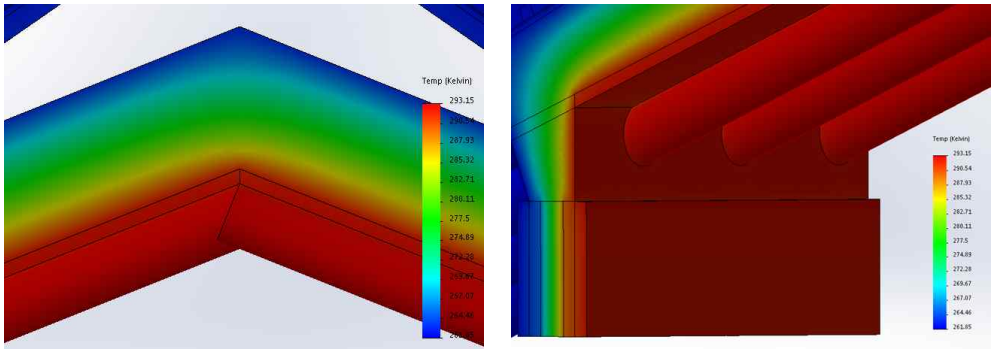
4.3.4. 신한옥 지붕의 열 성능 개선 시 효과

앞서 제시된 모든 단열의 개선 방안은 공통적으로 신한옥 지붕에서 발생하는 열교를 없애거나 줄여 열 성능을 향상시키는 것을 목표로 하고 있다. 이를 검증하기

위해 신한옥 지붕의 전열해석 모델에 앞서 제시한 개선 방안을 모두 적용하여 전열해석을 실시하였다. 이에 따라 열 성능이 개선된 신한옥의 지붕은 열 성능이 어느 수준까지 향상될 수 있는지 분석하였다.

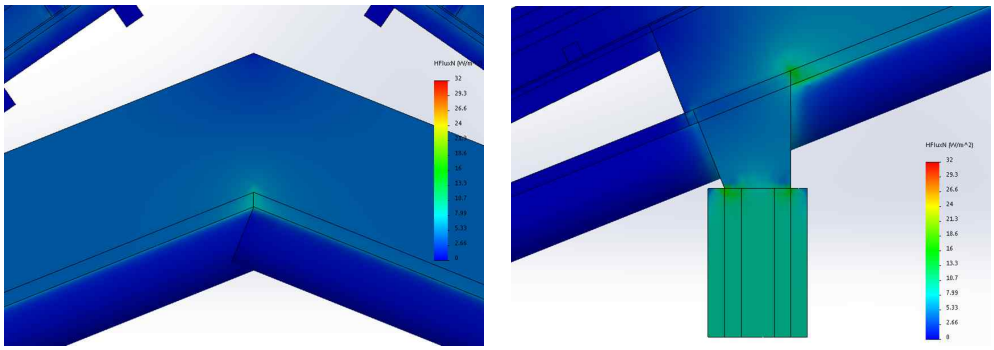
가. 지붕면 부위 모델

열 성능이 개선된 신한옥의 지붕면 부위 모델 전열해석 결과 온도 분포 및 열유속 분포는 각각 [그림 4.14], [그림 4.15]와 같다. [그림 3.20]의 온도 분포에 비해 [그림 4.14]의 온도 분포는 더 안정적이다. 지붕면 상부에서 서까래나 적심도리 등 열교 부재가 제거되어 등온선이 꺾이는 부위가 사라지고



(a) 지붕면 상부 (b) 당골막이 부위

[그림 4.14] 열 성능 개선 신한옥의 지붕면 부위 모델 해석 결과 온도 분포



(a) 지붕면 상부 (b) 당골막이 부위

[그림 4.15] 열 성능 개선 신한옥의 지붕면 부위 모델 해석 결과 열유속 분포

면에 평행한 등온선을 갖는 것을 확인할 수 있다. 당골막이 부위에서도 상부, 서까래 둘레, 하부의 모서리를 따라서 온도 저하가 발생하는 [그림 3.20]의 결과와 달리 [그림 4.14]에서는 해당 모서리에서의 온도 저하가 심하지 않다.

[그림 4.15]의 열유속 분포에서는 열 성능의 개선 여부를 보다 확연하게 판단할 수 있다. 지붕면 상부에서는 모서리에서 발생하는 일부 구조적인 열교를 제외하면, 지붕면 상부를 따라서 일반 면 부위와 거의 동일한 열류 패턴을 보인다. 별도의 개선 방안을 적용하지 않은 지붕틀 부위에서는 이전과 거의 동일한 열유속을 갖지만, 당골막이 부위의 개판과 서까래, 도리 등 부위에서도 [그림 3.21]과 비교하여 현저하게 열유속이 감소한 것을 확인할 수 있다.

열 성능이 개선된 신한옥 지붕면 부위 모델의 해석 결과 실내 표면온도와

<표 4.14> 신한옥 지붕면 부위 모델의 열 성능 개선에 따른 표면온도 비교

부재	표면온도 (실온과의 온도차) (℃)		실온과의 온도차의 감소율(%)
	기존 모델	열 성능 개선 모델	
실내표면 평균	19.09 (0.91)	19.45 (0.55)	39.56

<표 4.15> 신한옥 지붕면 부위 모델의 열 성능 개선에 따른 열유속 비교

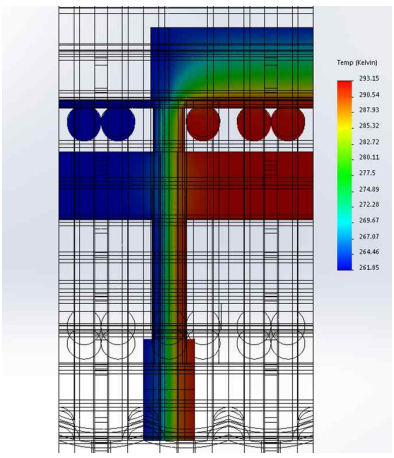
부재	평균 열유속 (W/m^2)		열유속 감소율 (%)
	기존 모델	열 성능 개선 모델	
실내표면 전체	9.36	6.18	33.97
개판 전체	6.60	5.70	13.64
개판 중심부	4.90	4.90	0.00
개판-서까래둘레	10.02	- (제거됨)	-
개판 상부모서리	16.40	9.43	42.50
당골막이 전체	12.12	6.26	48.35
당골막이 중심부	5.63	5.42	3.73
당골막이 상부모서리	40.33	8.41	79.15
당골막이 하부모서리	32.39	12.86	60.30
당골막이-서까래둘레	25.93	6.31	75.67
도리	24.39	8.89	63.55

실내 표면 열유속을 기존 신한옥 모델의 해석결과와 비교하면 각각 <표 4.14>, <표 4.15>와 같다. 실내 표면온도는 기존의 19.1℃에서 패시브하우스보다도 높은 19.5℃로 증가하였다. 실온(20℃)과의 온도차가 기존 모델의 0.9℃에서 열 성능 개선 모델의 0.5℃로 약 40% 감소한 것은 상당한 열 성능의 개선이 이루어진 것으로 보인다.

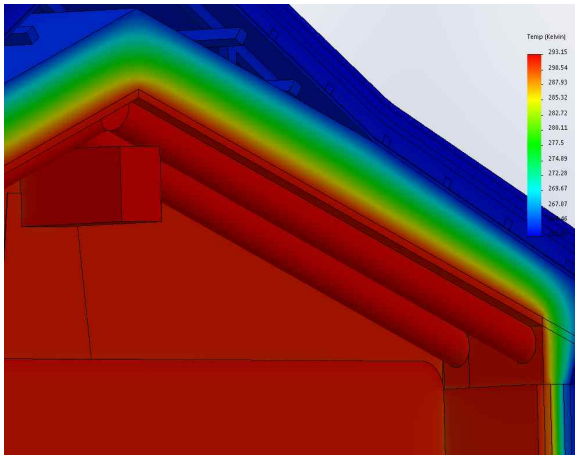
주요 부재에서의 실내표면을 통한 열유속에서도 상당한 열 성능의 개선을 확인할 수 있었다. 실내표면 전체의 열유속 평균은 약 34% 감소하였고, 열교부위 또는 열교 부위를 포함하는 부재 등에서 약 14~79%의 열유속 감소가 발생하였다. 열교가 가장 심하게 발생하는 모서리 부위에서도 평균 열유속은 12.86 W/m^{2}이 최대인 것으로 보아 기존 모델에서의 열교는 대부분 개선된 것으로 판단할 수 있다.

나. 박공벽 부위 모델

박공벽 부위 모델도 동일한 방법으로 열 성능 개선 모델과 기존 모델을 비교하였다. 열 성능이 개선된 신한옥의 박공벽 부위 모델 전열해석 결과 온도분포 및 열유속 분포는 각각 [그림 4.16], [그림 4.17]과 같다. 열 성능이 개선된 한옥의 온도 분포에서는 열교가 눈에 띄게 줄어든 것을 확인할 수 있다. 박공벽 단면의 온도 분포를 [그림 3.22]와 비교하면, 기존 신한옥 모델에서는 단열이 시공되지 않은 대량, 판대공, 개판 등의 부위를 따라 표면 온도가 감소하여 단면의 온도 분포가 호리병과 같이 굴곡이 발생하였다. 그러나 열 성능 개선 모델에서는 부재의 면과 거의 평행하게 등온선이 형성된 것을 보아 단열이 충분하게 개선되었음을 알 수 있다. 당골막이와 대량 판대공 등 부위에서도 [그림 3.22]에서는 모서리를 따라서, 대량과 판대공 면 등을 따라서 표면온도의 저하를 확인할 수 있지만, [그림 4.16]에서는 도리와 대량이 만나는 부위 등을 제외하면 대체로 일정한 실내 표면온도를 보인다.

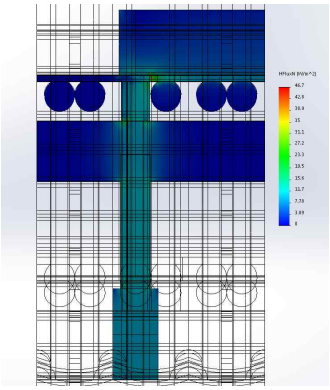


(a) 박공벽 단면

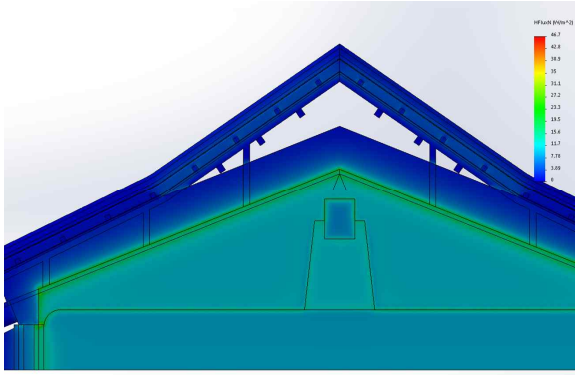


(b) 대량/판대공 및 당골막이 부위

[그림 4.16] 열 성능 개선 신한옥의 박공벽 부위 모델 해석 결과 온도 분포



(a) 박공벽 단면



(b) 대량, 판대공 및 서까래 부위 단면

[그림 4.17] 열 성능 개선 신한옥의 박공벽 부위 모델 해석 결과 열유속 분포

열유속 분포를 분석하여 보면, [그림 4.17]의 열 성능 개선 모델에서도 여전히 모서리 부위 등을 따라 열교가 발생하기는 하나, 대량과 판대공의 면을 통한 열류는 [그림 3.23]과 달리 박공벽과 거의 동일한 수준으로 감소한 것을 확인할 수 있다. 또한, 박공벽을 관통하는 서까래가 제거되고, 개판 등 열교 부위가 개선되어 박공벽의 상부 모서리를 따라 발생하는 열유속 또한 [그림 3.23]에 비해 상당히 감소한 것을 확인할 수 있다.

열 성능이 개선된 신한옥 박공벽 부위 모델의 해석 결과 실내 표면온도와 실내 표면 열유속을 기존 신한옥 모델의 해석결과와 비교하면 각각 <표 4.16>, <표 4.17>과 같다. 실내 표면 온도는 지붕면 부위 모델과 마찬가지로 18.4℃에서 패시브하우스보다 다소 높은 수준인 19.2℃로 증가하였다. 실온과의 온도차 또한 기존 모델에 비해 50% 수준으로 감소하여 상당한 열 성능 개선이 이루어진 것을 확인할 수 있다.

<표 4.16> 신한옥 박공벽 부위 모델의 열 성능 개선에 따른 표면온도 비교

부재	표면온도 (실온과의 온도차) (℃)		실온과의 온도차의 감소율(%)
	기존 모델	열 성능 개선 모델	
실내표면 평균	18.36 (1.64)	19.18 (0.82)	50.00

<표 4.17> 신한옥 박공벽 부위 모델의 열 성능 개선에 따른 열유속 비교

부재	평균 열유속 (W/m^2)		열유속 감소율 (%)
	기존 모델	열 성능 개선 모델	
실내표면 전체	20.13	9.56	52.51
개판 전체	15.35	7.89	48.60
개판 중심부	5.00	4.98	0.40
개판-서까래둘레	17.91	- (제거됨)	-
개판 상부모서리	31.05	11.03	64.48
당골막이 전체	14.51	7.34	49.41
당골막이 중심부	5.64	5.51	2.30
당골막이 상부모서리	44.61	9.84	77.94
당골막이 하부모서리	36.55	15.38	57.92
당골막이-서까래둘레	27.71	7.05	74.56
도리	27.35	10.23	62.60
대량 및 판대공	26.29	9.62	63.41
박공벽 전체	18.54	11.63	37.27
박공벽 중심부	10.58	10.58	0.00
박공벽모서리	45.74	13.88	69.65
서까래(박공벽관통)	32.70	- (제거됨)	-
서까래모서리 (박공벽관통)	34.26	- (제거됨)	-

<표 4.18> 신한옥 지붕의 열 성능 개선에 따른 평균 열관류율 비교

주택 유형	지붕면 부위 모델 평균 열유속 (W/m^2)	박공벽 부위 모델 평균 열유속 (W/m^2)	**평균 열관류율** (W/m^2·K)
기존 모델	9.36	20.13	**0.323**
열 성능 개선 모델	6.18	9.56	**0.205**

주요 부재에서 실내 표면을 통한 열유속 또한 지붕면 부위 모델과 같이 열 성능의 개선을 확인할 수 있었다. 실내표면 전체를 통한 열유속은 53% 가량 감소하였고, 열교 부위 또는 열교 부위를 포함하는 부재 등에서 약 37~78%의 열유속 감소가 발생하였다. 열교가 가장 심하게 발생하는 모서리 부위에서도 평균 열유속은 13.88 W/m^{2}이 최대이므로 박공벽 부위 모델에서도 또한 기존 모델에서 발생하는 열교 부위가 대부분 개선된 것으로 판단할 수 있다.

최종적으로 기존의 신한옥 지붕과 열 성능이 개선된 신한옥 지붕의 평균 열관류율을 비교하였다. <표 4.18>과 같이 신한옥 지붕의 열교 부위에 적절한 조치만 취해진다면, 열 성능은 패시브하우스 지붕의 수준까지도 근접할 수 있다. 본 연구의 열 성능 개선 모델에서 제안하지 않은 지붕틀 부위의 단열 방안이나 더 효율적인 개선 방안 등이 제시된다면, 신한옥 지붕도 충분히 패시브하우스 수준의 열 성능을 발휘할 수 있을 것으로 판단된다.

4.4 소결

본 장에서는 주택 형태 별 지붕의 열 성능 평가 결과를 바탕으로 다른 주택 형태와 비교한 신한옥 지붕의 상대적인 열 성능 수준을 파악하고, 신한옥 지붕에서의 열교 발생 부위와 발생 원인을 규명하였다. 이와 더불어 밝혀진 열교 발생 부위에서 열교를 막아 지붕 전체의 열 성능을 향상시킬 수 있도록 적용 가능한 단열 시공 개선 방안을 제시하였다. 본 장의 내용을 요약하면 다음과 같다.

1) 신한옥, 전통한옥, 현대 주택 및 패시브하우스에 대한 전열해석 결과를 이용하여 다른 주택 형태와 비교한 신한옥의 상대적 열 성능 수준을 파악하였다. 표면온도와 온도차비율, 평균 열관류율을 비교한 결과 신한옥은 전통한옥에 비해 열 성능이 충분히 향상되었으나 단열 수준이 높은 현대 주택과 패시브하우스에 비해서는 여전히 낮은 수준임을 확인하였다. 열교에 의한 열손실이 동일한 수준이라면 전체 열손실 중 열교에 의한 열손실의 비율은 열 성능이 높은 순으로 나타나야 한다. 그러나 지붕의 실내 주요 표면에서의 열교에 의한 열손실의 비율을 비교한 결과 신한옥 지붕에서 대체로 열손실 비율이 가장 높은 것을 확인하였다. 이를 종합하면 신한옥의 지붕에서 발생하는 열교 현상 등에 따른 추가적인 열손실이 다른 형태의 주택 지붕보다 훨씬 크게 발생하는 것으로 판단할 수 있다.

2) 신한옥 지붕의 부위 별 열교 발생 부위를 확인하고 그 원인을 분석한 결과 단열재가 불연속되는 모든 부위에서 열교가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 지붕면 상부의 단열재를 관통하는 서까래와 적심도리 부위, 지붕면 중심부의 지붕틀 부위, 당골막이 상부의 개판, 당골막이를 관통하는 서까래, 당골막이 하부의 도리, 박공벽 상부의 개판, 대량 및 판대공, 박공벽을 관통하

는 서까래 등 부위가 신한옥 지붕의 주요 열교 발생 부위로 확인되었다. 대부분의 열교는 일부 부재가 단열재 사이를 관통하거나 애초에 단열이 시공되지 않는 구조 부재가 실내·외 사이를 바로 접하면서 발생하였다. 열교는 당골막이 상부의 개판을 따라 가장 심하게 발생하였으며, 이 부위에서 당골막이 중심부에 비해 최대 7.2배의 열손실이 발생하였다. 반면 지붕틀 부위에서는 열교 현상이 가장 약하게 나타났다. 중심부에 비해 최대 1.8배의 열손실이 발생하였다.

3) 열교 발생 부위 별로 발생 원인에 따라 시공될 수 있는 적절한 단열 개선 방안을 제시하였다. 단열이 끊기는 부위의 부재를 단열재로 치환하거나 단열재가 시공되지 않는 구조 부재 내부에 단열을 위한 공간을 확보하는 등의 방안이 제시되었다. 지붕틀 부위를 제외한 모든 부위에서 단열재가 연속하도록 제안하였다. 열 성능 개선 후 신한옥 지붕의 평균 열관류율은 0.205 $W/m^2 \cdot K$로 기존의 0.323 $W/m^2 \cdot K$에 비해 약 63% 수준으로 감소하였다. 신한옥 지붕에서는 다양한 부위에서 열교가 발생하여 현대 주택이나 패시브하우스에 비해 열 성능이 낮은 수준이나, 대부분의 열교 현상은 적절한 조치를 취해 막을 수 있으며, 이 경우 지붕의 열 성능은 패시브하우스의 수준까지 근접할 수 있는 것을 확인할 수 있었다.

제 5 장 결 론

본 연구는 접합 부위가 많고 3차원의 복잡한 형태를 갖는 신한옥 지붕의 열 성능을 정량적으로 평가하고, 열 성능 저하 원인을 분석하여 열 성능 개선 방안을 제시하는 것을 목표로 진행되었다. 다른 형태의 주택 지붕과 비교한 신한옥 지붕의 정량적인 열 성능 차이를 비교, 분석하기 위해 각각의 지붕에 대한 3차원 전열해석을 실시하였다. 계산 결과를 바탕으로 신한옥의 열 성능 수준을 판단하였다. 이와 더불어 신한옥 지붕에서 열 성능 저하가 발생하는 열교 부위를 규명하고, 열교에 의한 영향과 원인을 분석하였다. 최종적으로 신한옥 지붕의 열 성능을 개선할 수 있는 부위 별 방안을 제시하고 그 효과를 입증하였다. 연구 결과 신한옥 지붕의 정량적인 열 성능 수준을 파악할 수 있었으며, 열 성능의 개선 가능성과 방향이 제시되었다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 신한옥과 전통한옥, 현대 주택, 패시브하우스 지붕의 전열해석 결과 실내 표면온도를 바탕으로 한 평균 표면온도와 온도차비율, 열유속을 바탕으로 한 평균 열관류율을 비교하였다. 신한옥은 전통한옥에 비해서는 높은 표면온도와 낮은 온도차비율, 열관류율을 보여 전통한옥에 비해서는 열 성능이 대폭 개선된 것을 확인하였다. 전통한옥과 달리 지붕 전체적으로 단열재가 적용되면서 열 성능이 크게 향상되었다. 그러나 비슷한 단열 수준을 가진 현대 주택이나 패시브하우스에 비해서는 표면온도는 낮고, TDR과 열관류율은 높게 계산되었다. 일반 면 부위에서의 열관류율이 비슷한 것으로 볼 때, 신한옥의 지붕에서 열교에 의한 열손실이 더 큰 것을 확인하였다.

2) 지붕을 통한 전체 열손실 중 열교에 의한 열손실의 비율을 확인하기 위해 지붕의 부위 별로 열유속을 비교한 결과, 신한옥의 지붕면과 벽체면에서 열교에 의한 열손실이 가장 높았다. 열 성능이 더 낮음에도 열교에 의한 열손실 비율이 더 높은 것으로, 신한옥 지붕은 열교 부위에서의 열 성능 저하가 일반적인 형상을 가진 주택에 비해 크게 발생하였다. 신한옥 지붕에서의 주요 열교 발생 원인은 단열재를 관통하여 시공되는 개판, 서까래 등의 부재에 의한 단열재 불연속과, 단열이 시공되지 않고 실내·외 모두 접하고 있는 구조 부재의 시공으로 판단된다. 열교의 영향을 받지 않는 중심부에 비해 열교 부위에서 최대 1.8~7.2배의 열손실이 발생하였으며, 특히 단열재가 불연속하는 면적이 넓은 당골막이 부위에서 크게 나타났다. 위치에 따라 열교에 의한 영향 정도는 상이하지만, 대부분 전통한옥의 형태를 그대로 따르기 때문에 발생하는 부재 간 간섭에 의해 발생하는 것으로 파악되었다.

3) 신한옥 지붕의 열교 발생 부위에서 단열재가 연속하여 시공될 수 있도록 단열의 개선 방안을 적용한 결과, 열 성능이 크게 개선되어 적용 효과가 입증되었다. 다양한 부위에서 발생하는 열교를 방지하기 위하여 구조적 역할이 적은 열교 발생 부재는 동일한 형상의 단열재로 대체하고, 그렇지 않은 부재에 대해서는 구조적으로 보강된 단열재를 삽입하는 등의 방법으로 열 성능을 개선하였다. 열 성능이 개선된 신한옥 지붕은 현대 주택의 지붕보다는 높고 패시브하우스의 지붕과 비슷한 수준으로 열 성능이 향상되었다. 전통한옥의 디자인을 따르면서 부재 간 많은 간섭이 발생하는 신한옥의 지붕도 단열재 불연속에 대한 대책이 마련된다면 충분히 현대 주택 이상의 열 성능을 확보할 수 있음을 입증하였다.

참 고 문 헌

1. 강승희, 정영수, 『신한옥 산업화 및 활성화를 위한 공공정책 현황과 제안』, 정예씨, 2014.
2. 건축도시공간연구소 외, 한옥 활성화 실천방안 연구, 국토해양부, 2010.
3. 국토교통부, 건축물의 에너지절약설계기준 [국토교통부고시 제2014-957호, 2014.12.30., 일부개정]
4. 국토교통부, 건축물의 에너지절약 설계기준 해설서 [국토교통부고시 제2014-957호], 2015, pp.151-156.
5. 김왕직, 『알기쉬운 한국건축 용어사전』, 동녘, 2013.
6. 농림축산식품부, 농촌주택 표준설계도서(농림-12-26-가-1), 2012. (국토교통부 공고 제2014-1548호(2014.12.15.)
7. 명현국, 『Computational Fluid Dynamics』, 문운당, 2014.
8. 박병규, 이경희, 지붕형태에 따른 열성능 평가에 관한 실험적 연구, 대한건축학회논문집 계획계, v.17 n.9, 2001, pp.305-312.
9. 서승직, 최원기, 『건축 열환경 이론 및 분석 기초』, 일진사, 2009.
10. 심경미, 서선영, 최근 한옥입주자 특성 및 한옥수요 조사 연구, 건축도시공간연구소, 2012.
11. 이미진 외 5인, 석재 커튼월-지붕층 슬라브 접합부의 단열 및 결로방지 성능향상에 관한 연구, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, v.25 n.1, 2005, pp.475-478.
12. 이주옥, 한필원, 현대한옥 설계의 경향 연구, 한국건축역사학회 추계학술발표대회 논문집, 한국건축역사학회, 2010, pp.135-145.
13. 임아람, 사무소 건물 커튼월 시스템의 표면결로 방지 성능 기준에 관한 연구, 이화여자대학교 대학원 석사학위 논문, 2013.
14. 전봉희, 한옥의 유형과 신한옥의 지향점, 대한건축학회지 v.57 n.4, 대한건축학회, 2013, pp.58-61.
15. 정영수, 김우중, 하지원, 신한옥 건설통합정보화를 위한 표준정보분류 및 사업번호체계, 한국CAD/CAM학회 논문집 제 17권 제 4호, 한국CAD/CAM학회, 2012, pp.225-233.
16. 한옥기술개발연구단, 미래주거문화 한옥이 대안이다, 한옥기술개발연구사업 리플릿, 국토교통부, 2013.

17. 한옥 등 건축자산의 진흥에 관한 법률 제1장 제2조 3호 [시행 2015.6.4.] [법률 제12739호, 2014.6.3., 제정]
18. Albatici, R. and Tonelli, A. M., Infrared Thermovision Technique for the Assessment of Thermal Transmittance Value of Opaque Building Elements on Site, Energy and Buildings, 42(11), 2010, pp.2177-2183.
19. Al-Sanea, Sami A., Finite-Volume Thermal Analysis of Building Roofs under Two-Dimensional Periodic Conditions, Building and environment 38.8, 2003, pp.1039-1049.
20. Ascione, F., et al., Different Methods for the Modelling of Thermal Bridges into Energy Simulation Programs : Comparisons of Accuracy for Flat Heterogeneous Roofs in Italian Climates, Applied Energy, 97, 2012, pp.405-418.
21. ASHRAE, Cooling and Heating Load Calculation Manual, ASHRAE, 1980.
22. Belusko, M., Pockett, J., Bruno, F. and Saman, W., Summer Thermal Resistance Measurement of Timber Framed Roofing Systems and Benefits of Reflective Paints, the 48th Australian Solar Energy Society Annual Conference, 2010.
23. Blancett, R. S., McBride, M. F., Sepsy, C. F. and Jones, C. D., A Model for Predicting Residential Attic Space Air Temperatures, ASHRAE Transactions Vol.85 Pt. 1, 1979, pp.656-663.
24. Bozonnet, E., Doya, M. and Allard, F., Cool Roofs Impact on Building Thermal Response: A French Case Study. Energy and Buildings, 43(11), 2011, pp.3006-3012.
25. Déqué, F., Ollivier, F. and Roux, J. J., Effect of 2D Modelling of Thermal Bridges on the Energy Performance of Buildings: Numerical Application on the Matisse Apartment, Energy and buildings, 33(6), 2001, pp.583-587.
26. Fairey, P. and Swami, M. Analysis of Attic Radiant Barrier Systems Using Mathematical Models, Proceedings of the Fifth Symposium on Improving Building Systems in Hot and Humid Climates, 1988, pp.186-193.
27. Flanders, S. N., Heat Flux Transducers Measure In-situ Building Thermal Performance, Journal of Building Physics, 18(1), 1994, pp.28-52.
28. Fokaides, P. A. and Kalogirou, S. A., Application of Infrared

Thermography for the Determination of the Overall Heat Transfer Coefficient (U-Value) in Building Envelopes, Applied Energy, 88(12), 2011, pp.4358-4365.
29. FSEC, EnergyGauge USA: A Residential Building Energy Simulation Design Tool, Florida Solar Energy Center, 1999.
30. GDI - Gemeinschaft Dämmstoff Industrie, PASSIVHAUS - Details Fur Anwender, GDI, 2004, p.20. (Massivbau GDI-Nr 1.15)
31. Gorthala, R., Harris, K. T., Roux, J. A. and McCarty, T. A., Transient Conductive, Radiative Heat Transfer Coupled with Moisture Transport in Attic Insulations, Journal of thermophysics and heat transfer, 8(1), 1994, pp.125-132.
32. Joy, F. A., Improving Attic Space Insulation Values, ASHRAE Transactions Vol.64, 1958, pp.251-266.
33. Kaşka, Ö. and Yumrutaş, R., Comparison of Experimental and Theoretical Results for the Transient Heat Flow through Multilayer Walls and Flat Roofs, Energy, 33(12), 2008, pp.1816-1823.
34. Kreider, J. F.,Curtiss, P. S. and Rabl, A, Heating and Cooling of Buildings: Design for Efficiency, CRC Press, 2010.
35. Kusuda, T., Pierce, E. T. and Bean, J. W., Comparison of Calculated Hourly Cooling Load and Attic Temperature with Measured Data for a Houston Test House. ASHRAE Transactions Vol.87 Pt 1, 1981, pp.1185-1198.
36. Michels, C., Lamberts, R. and Güths, S., Theoretical/Experimental Comparison of Heat Flux Reduction in Roofs Achieved Through the Use of Reflective Thermal Insulators, Energy and Buildings, 40(4), 2008, pp.438-444.
37. Miranville, F., Boyer, H., Lauret, P. and Lucas, F., A Combined Approach for Determining the Thermal Performance of Radiant Barriers under Field Conditions, Solar Energy, 82(5), 2008, pp.399-410.
38. New, J. R., et al., Development of a Roof Savings Calculator. Proceedings of the RCI 26th International Convention and Trade Show, 2011, pp.1-20.
39. Parker, D., Technical Support for Development of an Attic Simulation

Model for the California Energy Commission, Florida Solar Energy Center report: FSEC-CR-1526-05, Florida Solar Energy Center/University of Central Florida, 2005.
40. Peavy, B. A., A Model for Predicting the Thermal Performance of Ventilated Attics, Summer Attic and Whole-House Ventilation, 1979, pp.119-149.
41. Pisello, A. L., Cotana, F., Nicolini, A. and Buratti, C., Effect of Dynamic Characteristics of Building Envelope on Thermal-Energy Performance in Winter Conditions: In Field Experiment, Energy and Buildings, 80, 2014, pp.218-230.
42. Synnefa, A., Santamouris, M. and Livada, I., A Study of the Thermal Performance of Reflective Coatings for the Urban Environment. Solar Energy, 80(8), 2006, pp.968-981.
43. Tae-Gu Lim, et al., Analysis of the Thermal Bridge Effect in the Roof of New Hanok, Proceedings of the 10th International Symposium on Architectural Interchanges in Asia, 2014, pp.516-520.
44. TenWolde, A., FPL Roof Temperature and Moisture Model, Research Paper FPL-RP-561, USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1997.
45. Vollmer, M. and Möllmann, K. P., Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications, John Wiley & Sons, 2010.
46. Wilkes, K. E., Thermal Model of Attic Systems with Radiant Barriers, ORNL/CON-262, Oak Ridge National Laboratory, 1991.
47. http://www.phiko.kr/bbs/board.php?bo_table=z3_01&wr_id=2 (한국패시브건축협회 - 단열재 및 기타재료의 열전도율)
48. http://www.alc-dooson.co.kr/ (두손ALC건설 시공사례)
49. http://www.gijangnews.com/news/articleView.html?idxno=6388 ([최동군의 나도 문화해설사] 동궐도 분석 - 돈화문 주변1)
50. http://www.schoeck.com/cache/schoeckmedia_Image_Isokorb_K_US_1467x850px_rgb_72%5B8494%5D_schoeckmedia_image_thumbnailscheme_1280x1900.jpg (Schoeck사 제품 소개)

ABSTRACT

Thermal Performance Improvement of the Roof of New Hanok through Comparative Evaluation Considering Thermal Bridge Effects

By Lim, Tae Gu
Department of Architecture and Architectural Engineering
Master's Course in the Graduate School of
Seoul National University
Advised by Professor Yeo, Myoung Souk
2015. 8.

New Hanok which is thermally improved compared to traditional Hanok, became a new form of housing that is being spread from various subjects. Although new Hanok is emphasized that its thermal performance has been greatly improved, in most cases, only the fact that insulation is constructed is highlighted without quantitative data, or only approximate data is provided. Unlike windows or walls, as the roof of new Hanok has three-dimensional shape with a lot of connection among parts, thermal property is also complicated, so it is difficult to judge its thermal performance or occurrence of thermal bridge effect. This study was conducted to evaluate the quantitative thermal performance of new Hanok's roof in comparison with

different types of houses' roof, and to propose thermal performance improvements of new Hanok's roof by analyzing the cause of thermal performance degradation or thermal bridge effect.

Thermal performance of new Hanok's roof was compared to traditional Hanok, contemporary house, and passive house by numerical heat transfer analysis. Qualitative heat transfer analyses of each roof were applied to modeling processes, and the results were compared and analyzed. Based on the results of the analysis, the causes of thermal bridge effects with additional heat losses were established, after that, improved insulation details were proposed to improve the thermal performance of roof of new Hanok.

The results of this research are summarized as follows:

1) As a result of thermal analysis, it is shown that the thermal performance of new Hanok's roof was improved significantly compared to that of traditional Hanok. However, it is low compared to contemporary house and passive house even though the insulation levels of each are similar.

2) Comparing the rate of heat loss due to thermal bridge from the heat flux of each roof, the rate of new Hanok's roof was the highest even though its thermal performance is low. It is shown that the thermal degradation of thermal bridge parts in new

Hanok's roof is larger than typical houses.

3) Thermal bridge was occurred in all the parts where the insulation is penetrated or it is not constructed. The degree of impact due to the thermal bridge is different depending on the location. But most of them were found to occur due to interference among members to follow the shape of the traditional Hanok's roof. As improvements were applied to make insulation layers to be constructed continuously, thermally improved new Hanok showed a higher thermal performance than contemporary house, and also similar thermal performance to passive house. The study showed that the thermal performance of the roof of new Hanok could be enhanced in a higher level than contemporary house, if proper improvements are applied to each thermal bridge part.

Keywords : New Hanok, Roof, Thermal bridge, Thermal performance, U-value, Heat transfer, Thermal Analysis

Student Number : 2013-23027