

강도향상형 단열스터드 개발을 위한 트리즈 기법 활용방안

Invention Methodology of High Strength Insulated Steel Stud using TRIZ

조 봉 호* 김 선 숙** 곽 채 은***
Cho, Bong-Ho Kim, Sun-Sook Kwak, Chai-Eun

Abstract

This study used TRIZ methodology to develop a new steel stud for load bearing or non-load bearing walls. Technical contradiction of high strength with high insulation performance can be solved by TRIZ. We suppose a new shape of high-strength insulated (HSI) Stud. This study showed TRIZ can be usefully applied to the development of new construction materials by solving technical contradictions. Insulation performance of HSI stud can be improved approximately 12% compared to the standard KS stud. Although up to 3.9% of the flexural strength degradation is expected, compressive strength of HSI studs are improved from 4.1% to 8%. In conclusion, improved thermal performance and higher strength can be expected for the HSI stud developed using TRIZ.

Keywords : TRIZ, Technical contradiction, Thermal performance, Cold formed steel, Compressive strength

1. 서론

스틸스터드는 1mm전후의 강판을 C자형으로 냉간성형(Cold forming)하여 생산되는 건축 자재로 스틸하우스와 같이 수직 하중을 받는 부위나 칸막이벽과 같이 수직하중을 받지 않는 부위에 석고보드 등과 함께 건식벽체의 구성재로 널리 사용되고 있다. 스틸스터드는 건축물의 외벽과 내벽에 모두 사용 가능하며, 공통적으로 구조성능(압축강도 또는 휨강도)과 비구조성능(단열, 내화 및 차음성능 등)이 동시에 요구된다. 스틸스터드 벽체는 우수한 구조성능과 시공성 등 장점을 갖고 있으나, 열전도율이 높은 스틸을 사용하기 때문에 건축물의 외벽 부위에 사용되는 경우 열교 현상(Thermal bridge)에 의해 단열성능이 저하되고 결로 발생 우려가 증가하는 등 비구조성능 측면에서 취약하다는 문제점이 있다.

건축재료는 스틸과 같이 재료의 밀도가 높아지면 강도는 향상되지만 단열, 차음, 내화 등의 성능은 저하되는 것이 일반적이며, 스틸스터드 벽체의 낮은 단열성능도 이에 기인한다고 볼

수 있다. 즉, 스틸스터드의 강도를 증가시키는 것(재료 밀도의 증가) 단열성능을 향상시키는 것(재료 밀도의 감소)이 물리적으로 모순되기 때문에 스틸스터드 벽체의 단열성능을 향상시키는 데에 한계가 있는 것이다. 따라서 스틸스터드의 강도를 최대한 유지하면서 단열성능을 향상시키기 위해서는 이와 같은 물리적 모순이 해결되어야 한다. 물리적 모순을 해결하는 방법 중 대표적인 것으로 제조업에서 널리 사용되는 트리즈(TRIZ) 기법이 있다. 트리즈는 문제에 대해 가장 이상적인 결과를 정의하고, 그 결과를 얻는 데 관건이 되는 모순을 찾아내어 이를 극복할 수 있는 해결안을 도출하는 방법론을 말한다. 최근 구조성능 및 단열, 차음, 내화성능 뿐 아니라 시공성 확보, 경량화 등 건축 자재의 성능에 대한 요구가 보다 다양화되고 있으므로, 이러한 트리즈 기법을 통해 다양한 요구 조건을 만족시킬 수 있는 건축 자재의 개발이 가능할 것으로 예상된다. 본 논문에서는 트리즈를 이용해 스틸스터드의 강도와 단열성능을 동시에 향상시킬 수 있는 방안을 개발하고 그 성능을 평가하여, 건설자재 연구개발 시 트리즈의 가능성을 검토하고자 한다.

* 일반회원, 아주대학교 건축공학과 조교수, 공학박사, bhcho@ajou.ac.kr
** 일반회원, 아주대학교 건축공학과 조교수, 공학박사(교신저자), kss@ajou.ac.kr
*** 학생회원, 아주대학교 건축공학과 학사과정, chen1004@gmail.com

2. 예비적 고찰

2.1 단열스터드 관련 기존 연구 고찰

스틸스터드는 그림 1과 같이 석고보드 등과 함께 건식벽체로 구성되어 건축물의 외벽과 내벽에 모두 사용될 수 있으며, 적용 위치에 따라 다양한 성능이 요구된다. 내력벽용 스틸스터드와 비내력벽용 스틸스터드의 규격은 각각 KS D 3854와 KS F 4742에 규정되어 있으며, 스틸스터드 건식 벽체의 유형에 따른 요구성능은 표 1과 같다.

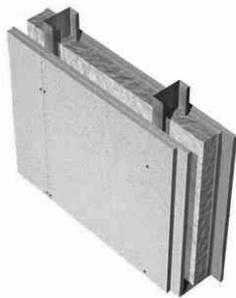


그림 1. 스틸스터드 건식벽체의 사용 예

표 1. 스틸스터드 건식벽체 유형별 요구성능

유형	내력벽용		비내력벽용	
	외부 벽체	내부 벽체	외부 벽체	내부 벽체
구조성능	압축강도 휨강도	압축강도 휨강도	휨강도	휨강도
비구조성능	단열성능 내화성능	내화성능 차음성능	단열성능 내화성능	내화성능 차음성능

스틸 재료의 높은 밀도는 구조성능 측면에서는 유리하나 열 및 진동의 전달과 관련된 단열, 차음, 내화 등 비구조성능의 측면에서는 불리하게 작용한다. 즉, 건축물의 외벽에 스틸스터드 구조체를 사용할 경우, 스틸스터드를 통한 열교로 인해 단열성능이 저하되고 결로 발생의 가능성이 높아질 우려가 있다. 이와 같은 문제점들을 해결하기 위하여 국내외에서 표 2와 같은 다양한 연구들이 수행된 바 있다.

스웨덴이나 핀란드와 같은 북유럽에서는 스틸스터드의 웨브에 슬릿을 두어 열전달 경로를 늘리는 방식으로 스틸스터드의 단열성능을 향상시킨 제품을 개발하여 사용해 왔다. 이러한 제품들은 단열성능은 향상되나 웨브에 설치되는 다수의 슬릿으로 인해 강도저하가 발생하는 문제가 있다. Hoglund, Stehn 등은 슬릿으로 인해 강도가 저하된 스틸스터드의 강도 및 단열성능을 기존의 스틸스터드와 비교하여 평가하였다.

표 2. 단열성능 향상형 스틸스터드 예

종류	형태	특징
웨브 슬릿형 스틸스터드		- 열전달 경로 증가에 따른 단열성능 향상 - 전단변형에 따른 휨성능 저하
웨브 굴곡형		- 열전달 경로 증가에 따른 단열성능 향상 - 웨브굴곡에 따른 스틸 물량 증가 - 휨성능 저하
FRP 복합형		- 웨브복합재료 적용에 따른 단열성능 향상 - 구조성능 향상 - 자재 생산성 저하

장철용 등은 스틸스터드의 웨브 부분에 절곡부를 추가함으로써 열전달 경로를 길게 하는 방식으로 스틸스터드 건식벽체의 열관류율을 크게 향상시킬 수 있음을 보였다. 이러한 벽체는 기존의 C형 벽체에 비해 강재량이 증가하며, 웨브의 변형으로 인해 휨강도가 저하되는 단점이 있다. 이상섭 등은 스틸스터드의 웨브 부위를 FRP로 대체하는 복합스터드를 제안하였다. 이들의 연구에 따르면 FRP를 에폭시를 이용해 강재에 부착함으로써 기존 스틸스터드 대비 압축성능이 향상됨을 볼 수 있다. Stehn 등은 FPF 및 Expanded Metal을 이용하는 복합스터드를 제안하였다. 이러한 복합 스틸스터드는 구조적 성능의 향상에도 불구하고 에폭시를 이용한 부착부위의 내구성 저하와 제조 과정의 복잡성 등은 단점으로 지적된다.

2.2 트리즈 기법의 적용 원리

트리즈는 러시아어 'Teo-riya Resheniya Izob retatel'skikh Zadatch'의 약자로 창조적 문제해결 이론(Theory of Inventive Problem Solving)을 의미하며, 옛 소련의 헨리 알트슐러(Genrich Altshuller) 박사에 의해 제창되었다. 트리즈의 핵심요소에는 두 가지가 있는데, 바로 '시스템'과 '모순'이다.

먼저, 시스템이란 특정한 기능을 구현하는 전체로서, 상호 작용에 의해 서로 관련을 맺고 있는 것들의 조직체이다. 시스템은 상위시스템과 하위시스템으로 구분되며, 모든 시스템은 그 시스템 자체가 목적이 아니라 어떤 특수한 기능을 수행하기 위해서 존재한다. 따라서 시스템이란 기능을 구현하기 위한 도구로 볼 수 있으며, 보다 이상적인 시스템이란 요구되는 기능을 수행하면서도 더 적은 자원을 소모하는 시스템으로 정의된다. 여기에서, 자원이란 물질, 장, 기능, 시간, 공간, 정보를 포함한다.

모순이란 시스템 내에서 서로 양립할 수 없는 것들 사이의 대립을 의미한다. 즉, 시스템의 한 특성을 개선하고자 할 때 그 시스템의 다른 특성이 악화되는 상황을 뜻한다. 본 논문에서 다루고 있는 구조적 성능과 단열성능은 하나의 특성이 개선되면 다른 성능이 악화되는 대표적인 예이다. 모순은 시스템 진화의 결과로서, 시스템이 진화하면서 모순은 늘어나고 이를 극복하면서 시스템이 발전하게 된다.

기술적 시스템은 진화 단계에 따라 개선되어 가는데, 특히 혁신적인 발전을 가져오는 기술적 개선은 그 기술적 시스템 내에 존재하는 ‘모순 극복’을 통해서만 가능하다. 따라서 모든 기술적 시스템에 혁신적 발전을 가져오기 위해서는 제일 먼저 그 시스템과 관련되어 ‘이상적인 최종 결과(IFR, Ideal Final Result)’를 달성하는데 장애가 되는 핵심 모순’을 찾아내어야 한다. 만약 시스템에서 모순을 찾지 어렵다면, 이는 대부분 문제가 잘못 정의되었기 때문으로 볼 수 있다.

모순을 극복하기 위한 트리즈의 대표적인 도구에는 39가지 모순행렬표와 40가지 발명원리가 있다. 모순을 일으키는 요인들을 표준 특징으로 변환하고 개선하려는 특징과 이에 수반되는 악화되는 특징을 각각 행과 열로 배치하여 모순행렬표로 구성한 후, 알트슐러에 의해 제안된 40가지 발명원리들을 이용해 해결책을 찾는 방법이다. 제조업 분야에서는 이 기법이 널리 적용되고 있으나, 건축분야에서는 적용 예가 드물다. Mann은 트리즈의 40가지 발명원리가 건축 분야에 적용된 예를 분석하여 제시하였고, Chiu 등은 트리즈를 이용해 단열성능이 향상된 지붕패널을 제안하였다. 국내에서도 건축분야의 제품 개발을 위해 식스시그마를 활용하거나 VE와 TRIZ를 연계한 설계방법론이 제안되었으나, TRIZ를 활용한 건설자재 개발과 관련된 사례는 거의 없다. 본 논문에서는 트리즈의 모순행렬표와 40가지 발명원리를 중심으로 구조성능 향상형 단열스터드의 물리적 모순을 해결함으로써 건설자재 개발 시의 적용성을 검토하고자 한다.

3. 트리즈를 이용한 단열스터드 개발

3.1 IFR과 물리적 모순의 설정

트리즈 기법 적용의 첫 단계로 먼저 스틸스터드의 이상적인 최종 결과(IFR)를 가정해 보면, ‘충분한 강도를 유지하면서 열교가 발생하지 않는 스틸드 또는 스틸의 강도를 가진 단열재’로 정의할 수 있다. 스틸드의 유무를 기준으로 물리적 모순을 설정해 보면, 스틸드가 있을 때 구조적 안정성이 높아지나 열교로 인해 단열성은 떨어진다. 반대로 스틸드가 없다면 구조적

안정성은 없지만 열교가 발생하지 않기 때문에 단열성은 높아진다. 즉, 핵심 모순은 구조적 안전성과 단열성능 두 가지로 압축할 수 있고 이를 모순 행렬표에 적용할 수 있는 트리즈의 39가지 파라미터 중 하나로 나타내면, 구조적 안전성은 [14] 강도(힘에 대한 반응으로 물체가 변화에 저항할 수 있는 정도, 파괴에 대한 저항), [13] 물체 구성의 안전성(관련된 물체나 시스템의 상호작용이 일으키는 변화에 대한 물체나 시스템의 저항력)으로 변환할 수 있고, 또한 단열성능은 [17] 온도(물체의 온도로 변환할 수 있다. 따라서 단열성능이 향상된 스틸스터드의 물리적 모순 설정을 요약하면 표 3과 같다.

표 3. 스틸스터드의 물리적 모순 설정

IFR : 충분한 강도를 유지하면서 열교가 발생하지 않는 스틸드 또는 스틸의 강도를 가진 단열재		
모순 설정 기준	물리적 모순	파라미터*
스티드 有	구조적 안정성 ↑, 단열성 ↓	강도 [14]* 물체 구성의 안전성[13]*
스티드 無	구조적 안정성 ↓, 단열성 ↑	온도 [17]*

* 트리즈의 모순행렬표에서 정의한 39가지 파라미터 중에서 선정(5)

3.2 모순행렬표의 적용을 통한 발명원리 도출

두 번째 단계에서는 표 3의 파라미터를 모순행렬표에 적용시킨 후, 개선하려는 파라미터와 악화되는 파라미터의 물리적 모순을 극복하기 위한 발명원리를 표 4와 같이 정리하였다. 예를 들어 개선되는 파라미터가 17(온도)이고 악화되는 파라미터가 14(강도)인 경우, 이 모순을 해결하기 위해서는 트리즈의 40가지 발명원리 중, 30 ‘유연한 막 또는 필름(Flexible Films or Thin Membranes)’, 10 ‘선행조치(Prior Action)’, 40 ‘복합재료(Composite Materials)’, 22 ‘전화위복(Convert Harm into Benefit)’ 등을 적용할 수 있다.

표 4. 모순행렬표의 적용 및 발명원리 도출

개선하려는 파라미터	악화되는 파라미터		
	안전성[13]	강도[14]	온도[17]
안전성[13]	-	-	35 속성 변환 1 분할 32 색깔 변경
강도[14]	-	-	30 유연한 막/필름 10 선행조치 40 복합재료
온도[17]	35 속성 변환 1 분할 32 색깔 변경	30 유연한 막/필름 10 선행조치 40 복합재료 22 전화위복	-

3.3 발명원리를 이용한 아이디어 도출

세 번째 단계는 모순행렬표의 발명원리에 기초하여 모순 해결을 위한 실질적인 아이디어를 도출하는 과정이다. 표 4의 발명원리에 기초하여 스틸스터드의 물리적 모순을 해결할 수 있는 아이디어를 도출한 예는 표 5와 같다.

표 5. 발명원리를 이용한 아이디어 도출

모순되는 파라미터	발명원리	아이디어
강도[14] -온도[17]	40 복합재료	- 스틸스터드의 Fe 성분에 Cr, Ni, C 등 다른 성분을 첨가함으로써 강도 증가와 단열성능 향상 - 스테인레스 스틸드로 소재가 고가
	30 유연한 막/필름	- 열전도율이 높은 웹 부분을 FRP등 열전도율이 낮은 재료로 대체함으로써 단열성능 향상 - 기존 제품(1,2)으로 제조비가 고가
안정성[13] -온도[17]	1 분할	- 스틸스터드를 구멍을 내어 열교가 일어나는 부분과 일어나지 않는 부분을 분할함으로써 열이 전달되는 경로를 길게 해주어 열전달 시간을 지연 - 기존 제품(2,4)으로 제조비가 고가

3.4 아이디어의 전개를 통한 시스템 개발

네 번째 단계는 도출된 아이디어 중 기존의 시스템과 중복되거나 제조비가 과다한 아이디어 등을 제외하고 상세 전개가 필요한 아이디어를 선정하여 시스템 개발을 진행하는 과정이다. 본 연구에서는 중복성 및 제조비 등을 고려하여 표 5의 아이디어 중 발명원리 30 '유연한 막/필름'을 활용한 아이디어를 선정하여 다음과 같이 3차에 걸친 상세 아이디어 전개 및 시스템 개발을 진행하였다.

1차 아이디어는 발명원리 30 '유연한 막/필름'을 활용하여 스틸스터드에 유연한 막을 덮어씌우는 방안이다. 구체적 적용 방법으로 그림 2와 같이 스틸스터드 전체에 단열재를 덮어 씌워 열교를 줄이는 방안을 생각할 수 있다. 이 경우 플랜지 부위에 씌운 단열재는 열교현상 감소에 도움이 되나, 웹 부위의 단열재는 열교현상을 감소에 사용되지 않기 때문에 비경제적이라는 문제점이 있으므로 다시 아이디어 전개를 통해 이를 해결하여야 한다.

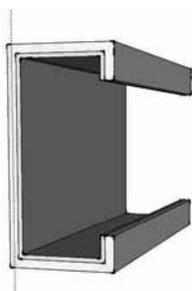


그림 2. 1차 아이디어 : 전체적으로 단열재를 씌운 스틸스터드

2차 아이디어에서는 1차 아이디어의 문제점을 해결하기 위하여 플랜지 부위에만 단열재를 씌우는 방안을 제안하였다. 스틸의 열교에 영향을 미치는 부위가 스틸의 플랜지 부위이므로, 그림 3과 같이 플랜지 부위에만 열 전달을 억제할 수 있는 단열재를 설치하여 전체적인 열교현상을 줄이는 방법이다. 이를 통해 1차 아이디어의 문제점은 해결할 수 있으나, 플랜지 부위와 단열재가 접착제에 의해 결합되므로 접착제에 의한 유해물질 등이 발생하고 시간 경과에 따라 접착력이 떨어지는 문제가 발생할 우려가 있다. 또한 스틸스터드에 부착된 단열재와 석고보드의 결합이 구조적으로 견고하지 못하여, 경량 벽체의 강도가 저하될 가능성도 있다.

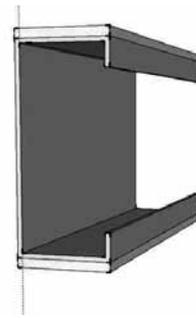


그림 3. 2차 아이디어 : 플랜지에만 단열재를 씌운 스틸스터드

3차 아이디어에서는 2차 아이디어의 문제점을 해결하기 위해 플랜지 형태를 변형하는 것을 제안하였다. 구체적인 적용방법으로 플랜지 부위가 접착제 없이도 단열재를 수용할 수 있도록 몰포밍으로 가공 가능한 오목한 형상으로 변형하고, 석고보드와 단열재가 견고하게 결합될 수 있도록 플랜지와 석고보드가 직접 접촉하는 최소한의 면적을 확보하였다. 특히 탄력성 있는 단열재가 플랜지와 결합된 후 빠지지 않도록 그림 4와 같은 형상으로 스틸스터드를 변형하고 플랜지 부위에 단열재를 끼워 넣도록 구상하였다.

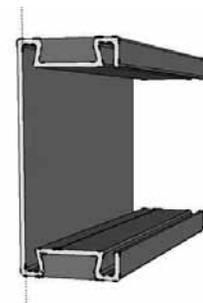


그림 4. 3차 아이디어 : 변형된 플랜지에 단열재를 끼운 스틸스터드

3차 아이디어 전개에 의해 도출된 스틸스터드의 경우, 직관적으로도 다음과 같은 파생 결과를 예상할 수 있다.

- ① 접착제 없이도 단열재 설치 가능
- ② 석고보드와 단열재 수용부 간의 결합은 스크류를 이용해 이루어지므로 구조적 결합 후 경량 벽체의 구조적 견고성 확보 가능
- ③ 양 플랜지의 절곡된 부분에 의해 플랜지 부위의 폭/두께비가 작아져 국부좌굴에 대한 저항력 증가
- ④ 접착제 없이 단열재를 끼워 넣으므로 공장 또는 현장에서 벽체 시공 용이
- ⑤ 실내 또는 실외로부터 전달되는 열이 스틸스터드의 단열재 수용부에 장착되는 단열재에 의해 차단
- ⑥ 석고보드와 스틸스터드의 구조적 결합을 위한 최소한의 접촉면적이 발생하지만 일반 C형 스틸스터드의 플랜지부위보다 적은 접촉면을 유지함으로써 스틸스터드를 통해 전달되는 열류 감소
- ⑦ 열전달이 지연되어 벽체 내화성능 확보에 유리
- ⑧ 스틸스터드를 통한 음의 전달 경로에서 플랜지 부위의 단열재가 소리를 일부 흡수하여 차음성능 향상 가능

이와 같은 아이디어 상세 전개에 의해 도출된 스틸스터드시스템의 단열재 및 석고보드 설치 과정을 예시하면 그림 5와 같다.

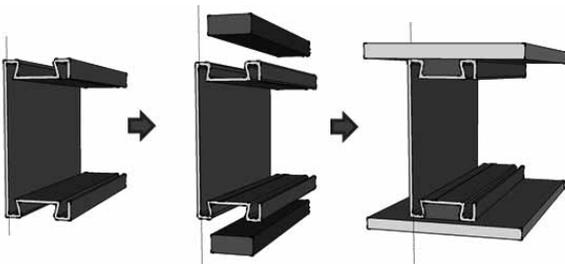


그림 5. 단열재 및 석고보드 설치 과정

3.5 시스템 상세 설계

다음으로는 트리즈를 이용한 단열스터드 개발의 최종 과정으로서 3.4에서 도출된 스틸스터드 단면 아이디어를 구체화하여 KS D 3854의 내력벽용 스틸스터드와 KS F 4742의 비내력벽용 스틸스터드를 대체할 수 있는 상세 단면 설계를 수행하였다. 본 연구에서 개발한 신형상 스틸스터드는 고강도를 유지하면서도 단열성능을 향상시킬 수 있으므로 HSI 스틸스터드(High Strength Insulated Stud)로 명명하였다.

KS F 4742의 100S4508스터드 및 이를 대체하는 HSI 스틸스터드의 단면 상세는 그림 6과 같다. HSI 스틸스터드는 플랜지 부분이 오목하게 절곡되어 유사한 성능을 발휘하는 기존 스틸스터드에 비해 단면의 두께를 줄일 수 있다. 표 5는 KS D 3854의 내력벽

용 스틸스터드와 KS F 4742의 비내력벽용 스틸스터드에 대응하는 HSI 스틸스터드의 단면과 부재의 단면적을 나타낸다.

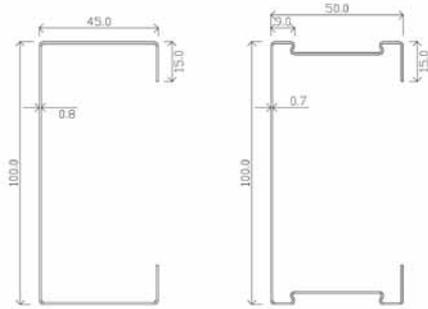


그림 6. 기존 스틸스터드와 고강도 단열스터드 단면 비교

표 5. KS 표준 스틸스터드와 HSI 스틸스터드의 단면 비교

구분	KS표준단면		HSI 스틸스터드 단면		단면 비교 (A2/A1)
	규격명 ¹⁾	단면A1 (mm ²)	치수 ²⁾	단면적 A2(mm ²)	
내력벽용 KS D 3854	75SL08	138.99	75*45*12*0.7	141.13	1.015
	100SL08	158.99	100*45*12*0.7	158.63	0.998
	125SL08	178.99	125*45*12*0.7	176.13	0.984
	150SL08	198.99	150*45*12*0.7	193.63	0.973
비내력벽용 KS F 4742	50S45-08	131.79	50*50*15*0.7	134.83	1.023
	75S45-08	151.79	75*50*15*0.7	152.33	1.004
	100S45-08	171.79	100*50*15*0.7	169.83	0.989
	125S45-08	191.79	125*50*15*0.7	187.33	0.977

1) KS표준단면 규격: 높이*폭*립의길이*두께
2) HSI 단면 규격: 높이*폭*립의길이*두께

내력벽용 및 비내력벽용 신형상 단면은 기존 스틸스터드에 비해 두께가 0.1mm 줄어들었으며, 플랜지 폭은 절곡부가 신설되는 것을 고려하여 기존 단면 대비 5mm 늘려 내력벽체용 스틸스터드는 45mm, 비내력벽체용 스틸스터드는 50mm로 설계하였다. 표 5에서 보는 바와 같이 HSI스터드의 단면적의 변화량은 기존 KS 표준 스틸스터드와 비교할 때 내력벽용은 (+)1.5~(-)2.8% 수준, 비내력벽용은 (+)2.3~(-)2.3% 수준으로 거의 유사함을 볼 수 있다.

4. 개발 제품의 성능 검증

개발된 HSI 스틸스터드는 트리즈의 발명 원리를 이용해 구조성능과 단열성능을 동시에 향상시킬 수 있도록 설계되었다. 표 1에서 보는 바와 같이 스틸스터드에는 구조성능, 단열성능, 내화성능, 차음성능 등 다양한 성능이 요구된다. 시제품을 제작하여 실험에 의한 성능평가를 수행하기에 앞서, 본 논문에서는 먼저 해석을 통해 평가 가능한 구조성능 및 단열성능에 대해 HSI 스틸스터드의 효용성을 검증하였다.

4.1 구조성능 검증(내력벽용 스틸스터드)

내력벽용 스틸스터드는 압축력 및 휨모멘트에 대해 저항하도록 설계된다. 따라서 단면의 압축강도와 휨 강도가 중요하게 고려되어야 한다. 본 논문에서는 냉간성형강 설계 기준인 AISI 2010에 따라 단면의 유효단면적을 고려한 압축강도와 휨 강도를 산정하였다. 강도 산정을 위해 냉간성형강 자재 구조해석 프로그램인 CFS 7.0을 사용하였다.

CFS7.0을 이용해 기존 KS D 3854 표준 스틸스터드와 HSI 스틸스터드의 냉간성형강 유효단면적을 고려한 압축강도 및 휨 강도를 산정한 결과는 표 6과 같다. 해석 대상인 4종류의 자재 중 높이가 가장 작은 75SL08에 대응하는 스틸스터드를 제외한 3종류의 스틸스터드는 KS표준 단면 대비 단면적이 감소하였다.

HSI 스틸스터드의 압축강도를 살펴보면, 4종류의 스틸스터드 모두 KS 표준형 스틸스터드에 비해 5.1~6.1%의 강도 향상이 이루어졌음을 볼 수 있다. 동일한 단면적에 대한 성능을 비교하기 위해, 두 종류의 스틸스터드 단면적을 동일하다고 가정할 경우 압축강도 향상은 4.1~8.0% 수준으로 스틸스터드의 높이가 커질수록 강도향상률이 높아짐을 볼 수 있다. 이는 그림 7의 압축 좌굴해석 결과에서 보듯이 플랜지부의 유효단면적 증가에 기인하는 것으로 판단된다.

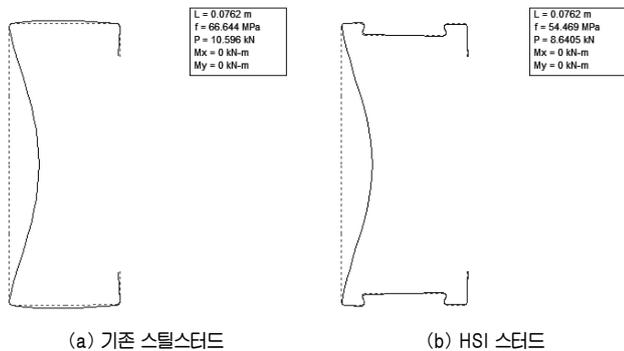


그림 7. KS 표준 스틸스터드와 HSI 스틸스터드의 압축좌굴모드 비교

휨 강도의 경우 75SL08과 100SL08자재의 경우, HSI의 휨 강도가 향상되나 길이가 긴 125SL08과 150SL08은 휨강도가

저하됨을 알 수 있다. 동일 단면을 가정하여 휨강도를 평가해 보면 HSI의 휨 강도는 KS 표준단면에 비해 (+)1.5~(-)3.9% 수준이었다. 이와 같이 HSI 스틸스터드의 압축강도 및 휨강도를 평가한 결과, 스틸스터드의 길이가 긴 경우 휨강도가 최대 3.9% 저하될 수 있으나, 압축강도는 4.1~8% 수준으로 향상되어 전반적인 강도 향상을 기대할 수 있음을 확인하였다.

4.2 단열성능 검증

트리츠 기법에 의해 제안된 HSI 스틸스터드의 단열성능은 그림 8과 같은 단면 구성의 건식 벽체에 대한 전열해석에 의해 평가하였다. 전열해석은 3차원 정상상태 해석 프로그램 Physibel Trisco 12.0w를 이용하였으며, 시뮬레이션에 사용된 벽체 구성 재료의 열전도율은 표 7과 같다. 실내외 경계 조건은 KS F 2277 건축용 구성재의 단열성 측정방법(9)에 따라 실내측은 온도 20℃, 표면열전달저항 0.11m²K/W, 실외측은 온도 0℃, 표면열전달저항 0.043m²K/W으로 설정하였다. 해석 벽체의 길이는 스틸스터드의 일반적 설치 간격이 450mm임을 반영하

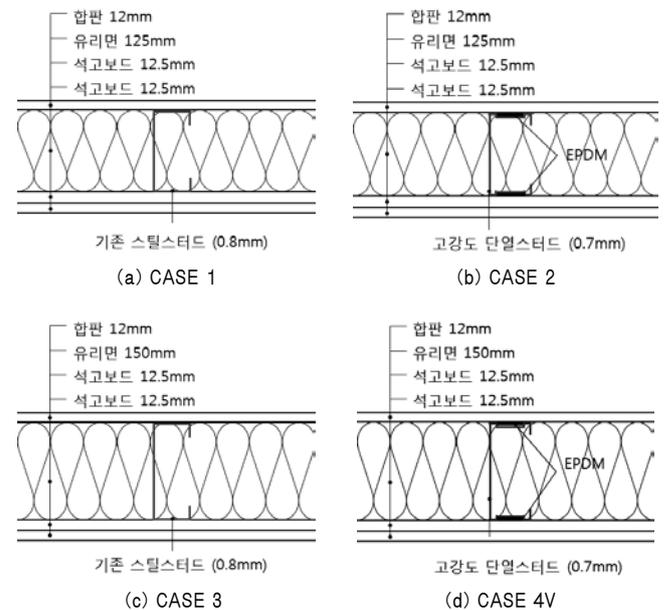


그림 8. 단열성능 평가용 벽체 단면

표 6. KS표준 스틸스터드와 HSI 스틸스터드의 압축강도 및 휨강도 비교

KS표준단면				HSI Stud 단면			단면 성능 비교				
구분	규격명	압축강도 (P1) (kN)	휨강도 (F1) (N-m)	치수	압축강도 (P2) (kN)	휨강도 (F2) (N-m)	단면적 (Ar)	압축강도 (P2/P1)	동일단면 가정 압축강도 (P2/P1*Ar)	휨강도 (F2/F1)	동일단면 가정 휨강도 (F2/F1*Ar)
내력벽용 (KSD3854)	75SL08	12,348	403.2	75*50*12*0.7	13,109	415.41	1,015	1.062	1,046	1,030	1,015
	100SL08	12,513	588.36	100*50*12*0.7	13,218	589.87	0.998	1,056	1,059	1,003	1,005
	125SL08	12,611	794.49	125*50*12*0.7	13,283	764.13	0.984	1,053	1,070	0.962	0.977
	150SL08	12,675	1,003.5	150*50*12*0.7	14,064	971.98	0.973	1,051	1,080	0.935	0.961

여, 스틸스터드의 중심을 기준으로 양쪽 각 225mm, 총 450mm 길이의 벽체에 대해 열전달 해석을 실시하였다.

표 7. 벽체 구성 재료의 열전도율

재료명	스틸	석고보드	유리면	EPDM	합판
열전도율 (W/mK)	50	0.25	0.035	0.019	0.24

스틸스터드를 포함한 4개 벽체 구조의 단열성능은 상당 열관류율 및 ISO 10211(10)에 따른 스틸스터드 열교 부위의 선형 열관류율을 기준으로 비교 분석하였다. 선형 열관류율이란 열교 부위만을 통한 열류를 나타낼 수 있는 값으로 클수록 열교가 큰 것을 의미하며, 식 (1)에 의해 구할 수 있다.

$$\psi = \frac{\Phi}{\Delta T} - \sum U_i l_i \quad \text{식 (1)}$$

여기에서,

- ψ : 선형 열관류율(W/mK)
- Φ : 해석 구조체를 통한 단위 길이당 전열량(W/m)
- ΔT : 실내 외 온도차(°C)
- U_i : 열교와 이웃하는 일반 부위의 열관류율(W/m²K)
- l_i : U_i 의 열관류율을 갖는 일반 부위 길이(m)

스틸스터드를 포함한 벽체의 온도 분포를 시뮬레이션한 결과는 그림 9와 같다. 예상하는 바와 같이, 스틸스터드 주위에 3차원 열교부위가 발생하는 것을 알 수 있으며, 단열스터드를 사용한 CASE 2와 4의 경우 EPDM 충전재 부위의 온도가 CASE 1과 3에 비해 상대적으로 높게 형성되는 것을 알 수 있다.

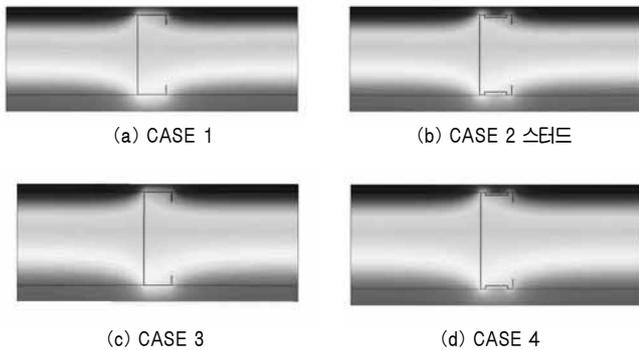


그림 9. 스틸스터드를 포함한 벽체 내부의 온도 분포

해석대상 벽체의 열관류율 및 스틸스터드에 의한 선형열관류율은 표 8과 같다. 스틸스터드를 제외한 벽체 구조의 열관류율은 단열재 두께가 125mm일 때 0.258W/m²K, 150mm일 때

0.218W/m²K로 국내의 지역별 건축물 부위의 열관류율표¹⁾ 중 '중부지역-외기에 직접 면하는 경우'에 해당되는 열관류율 기준 0.270W/m²K를 만족한다. 그러나 스틸스터드의 영향을 포함한 벽체의 상당 열관류율은 표 8과 같이 기준을 초과하는 것으로 나타나 스틸스터드를 통한 열교의 영향이 상당히 큰 것을 알 수 있다. 단열스터드를 사용한 CASE 2와 4는 기존 스틸스터드를 사용한 CASE 1과 3에 비해 전체 벽체의 상당 열관류율이 약 6~6.5% 정도 낮아졌으며, 특히 스틸스터드를 통한 열교 정도를 나타내는 선형 열관류율은 약 12% 정도 감소하여 트리즈 기법에 의해 제안된 HSI 스틸스터드의 단열 성능이 개선되었음을 확인할 수 있다.

표 8. 벽체 열관류율 및 스틸스터드에 의한 선형열관류율

구분	스틸스터드를 제외한 벽체 열관류율 (W/m ² K)	스틸스터드를 포함한 벽체의 상당 열관류율 (W/m ² K)	스틸스터드의 선형 열관류율 (W/mK)
CASE 1	0.258	0.529	0.122
CASE 2	0.258	0.496	0.107
CASE 3	0.218	0.473	0.115
CASE 4	0.218	0.442	0.101

HSI 스틸스터드는 실제 제품의 생산이 이루어지지 않았으므로 동일한 단열성능을 발휘하는 기존 스틸스터드와의 단열재 소요량을 비교함으로써 간략하게 경제성을 평가하였다. 표 8에서 보는 바와 같이 HSI 스틸스터드를 이용하면 동일한 단열성능을 발휘하면서도 기존의 스틸스터드와 비교하여 벽체의 두께 및 단열재의 두께를 줄일 수 있다. 일반 스틸스터드를 사용하여 단열재의 두께를 125mm(Case 1), 150mm(Case 3)로 하는 경우와 동일한 단열성능을 갖도록 HSI 스틸스터드를 이용해 벽체를 구성하면 표 9와 같이 단열재의 두께를 각각 113mm, 135mm로 줄일 수 있는 것으로 파악되었다. 표준품셈에 근거하여 단열재의 단위 면적당 비용을 산정해 보면, 약 10%의 비용 절감이 가능할 것으로 예상된다. HSI 스틸스터드는 표준형 스틸스터드에 비해 가공 과정은 약간 복잡하지만, 강제 소요량이 3%정도 적게 소요되어 스틸스터드 생산 비용은 유사하다. 국내 단열기준이 지속적으로 강화됨에 따라 단열재의 요구 두께도 증가하고 있으므로, 향후 HSI 스틸스터드 사용에 의한 추가적인 비용 절감이 예상된다. 또한 표준형 스틸스터드에 비해 벽체의 두께를 약 10% 정도 줄일 수 있어 사용면적 증대에 따른 추가적인 경제성 확보 및 결로방지 효과도 기대할 수 있다.

1) 2012년 11월에 입법예고된 국토해양부 고시 제2012-1473호 '건축물의 에너지 절약설계기준 개정안'을 기준으로 하였음.

표 9. HSI 스티드의 단열재 비용 평가

스틸스티드를 포함한 벽체의 상당 관류율 (W/m²K)	0.529		0.474	
	표준 125S45-08	HSI 125*50*15*07	표준 150SL08	HSI 150*45*12*07
스티드				
단열재 요구 두께(mm)	125	113	150	135
단위면적당 단열재 비용(원/m²)	14,850	13,424	17,820	16,038
단열재 비용 증감		-9.6%		-10%

5. 결론

본 연구에서는 단열성능을 향상시키면 강도가 저하되는 단열스티드의 물리적 모순을 트리즈 방법론을 이용하여 해결하고 이에 대한 상세 설계를 실시하여 고강도 단열스티드인 HSI 스티드를 제안하였다. '온도'와 '강도'의 모순 해결을 위해 트리즈의 발명원리 중 하나인 '유연한 막/필름'을 활용하여 스티드 스티드의 플랜지 부위를 롤포밍으로 가공하고 부분적으로 단열 성능이 높은 재료를 복합 사용하는 고강도 단열스티드를 개발하였다.

본 연구를 통해 개발된 고강도 단열스티드는 기존의 KS 표준형 스티드에 비해 단면적은 거의 유사하였고, 강도 측면에서 HSI스티드의 휨강도는 KS 표준형 자재에 비해 최대 3.9% 저하될 수 있으나, 압축강도는 4.1~8% 향상되어 압축력을 받는 내력벽 구조에서 전반적인 강도 향상을 기대할 수 있었다. 단열 성능 측면에서도 HSI스티드는 일반적인 조건에서 사용될 경우 기존의 KS 표준형 스티드에 비해 선형 열관류율이 약 12% 향상되는 것으로 나타났다. 특히 HSI스티드 이용 시 소요 단열재의 두께가 줄어, 벽체의 두께를 약 10% 정도 줄일 수 있으며 기존 표준형 스티드 대비 재료비도 절감할 수 있음을 확인하였다.

HSI 스티드는 플랜지 부위를 연질의 재료로 변형함으로써, 기존의 스티드에 요구되는 차음성능이나 내화성능 등의 향상도 기대할 수 있으나, 해석적 연구로 성능을 검증하기에는 한계가 있어 실험 등의 추가적인 연구를 통해 성능을 검증할 필요가 있다. 또한 기존 스티드와의 시공성 및 경제성 분석 등도 실제 제품의 생산 및 시험 시공을 통해 평가할 필요가 있다.

이와 같이 본 연구에서는 제품개발 및 성능검증 과정을 통해 물리적 모순의 해결을 위한 트리즈의 원리가 새로운 건설자재를 개발하는데 유용하게 적용될 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

이상섭 · 배규웅 (2004). "복합스티드의 압축 좌굴 거동". 한국강구조학회 논문집, 제 16권, 제5호, pp .609~619.

이인재 · 현창택 · 손명진 · 김대현 · 김윤식 (2011). "설계VE Idea 연계를 위한 성능기반 건물 부위별 기능분류체계 개발". 한국건설관리학회 논문집, 제12권 제5호, 한국건설관리학회, pp. 12~21

장철용 · 안병립 · 김치훈 · 홍원화 (2011). "스틸스티드의 형상 변화에 따른 건식벽체의 열성능 평가". 대한건축학회논문집, 제27권 제6호, pp. 221~228

정영일 · 서용철 · 구교진 · 현창택 (2003). "설계 VE의 효율적인 아이디어발상을 위한 TRIZ의 활용방안". 대한건축학회 논문집 구조계, 제19권 제8호, pp. 145~151

조봉호 · 이재승 · 차희성 (2011). "식스-시그마를 이용한 군독신자 숙소용 모듈러 건축 시스템 개발". 한국건설관리학회 논문집, 제11권 제6호, 한국건설관리학회, pp .89~100

KS F 2277 (2002). 건축용 구성재의 단열성 측정방법 - 교정 열상자법 및 보호 열상자법

Darrell Mann (2001). "40 Inventive Architecture Principles with examples", TRIZ Journal

Genrich Altshuller (2007). "The Innovation Algorithm", Technical Innovation Center

ISO 10211 (2007). "Thermal bridges in building construction - Heat flows and surface temperature - Detailed calculation"

L. Stehn, E Hedman-Petursson (2001). "Resistance and thermal insulation of a composite FRP-steel beam", Thin-walled Structures Vol 39, No. 5, pp. 375~394

Ruey-Sen Chiu and Shao-Tsai Cheng (2012). "The Improvement of Heat Insulation of Steel Roof Plates by TRIZ Application", Journal of Marine Science and Technology, Vol. 20, No. 2, pp. 122~131

T. Hoglund, H. Burstrand (1998) "Slotted steel studs to reduce thermal bridges in insulated walls", Thin-walled Structures Vol.32, pp. 81~109

논문제출일: 2012.09.25
 논문심사일: 2012.09.28
 심사완료일: 2013.02.01

요 약

스틸스터드는 스틸하우스와 같이 수직하중을 받는 부위나 칸막이벽과 같이 수직하중을 받지 않는 부위에 널리 사용되는 건축 자재이다. 본 연구는 단열성능을 향상시키면 강도가 저하되는 단열스터드의 물리적 모순을 트리즈 방법론을 이용해 해결하고 새로운 컨셉의 고강도 단열스터드인 HSI스터드를 제안하였다. 본 연구를 통해 물리적 모순의 해결을 위한 트리즈의 원리가 새로운 건축 자재를 개발하는데 유용하게 적용될 수 있음을 확인하였다. 트리즈를 이용해 개발된 고강도 단열스터드인 HSI 스테드는 기존의 KS 표준형 자재와 비교하여 약 12%의 단열성능 향상이 가능하고 벽체의 두께를 약 10% 정도 줄일 수 있다. 구조성능의 경우, 길이가 긴 스테드의 경우 일부 최대 3.9%의 휨강도 저하가 예상되나 4.1%~8%의 압축강도 향상으로 전반적인 구조성능 향상을 기대할 수 있다.

키워드 : 트리즈, 물리적 모순, 스틸스터드, 단열성능, 냉간성형강, 압축강도
