



THEME 03

직조 금속

강기주 | 전남대학교 기계시스템공학부, 교수 | e-mail : kjkang@jnu.ac.kr

이 글에서는 와이어를 직조하여 제조하는 새로운 다공질 금속의 개발 동향과 응용 및 특성에 대하여 소개하고자 한다.

와이어는 강도, 가격, 결합 측면에서 유리한 측면이 있어 일찍부터 이를 이용하여 트러스 PCM을 제조하려는 시도가 있었다. 1994년 grid sheet라는 이름으로 제안된 샌드위치 판재에는 와이어가 평직(plain weave)된 철망이 심재로서 사용되었다. 서로 수직인 씨실과 날실의 교차부의 두께가 심재의 높이가 되고 와이어 직조 간격을 조절하여 밀도를 조절할 수 있다. 발전용 증기터빈의 로터와 케이싱 및 자동차 구조용 패널로 사용되고 있다. 또한 평직된 철망을 삼각과 형태로 절곡하여 피라미드 트러스 형태로 만드는 방법도 제안된 바 있다. 이상은 단순히 와이어를 철망 형태나 이를 절곡하여 단층 트러스 형태로 변형하여 사용하는 것으로 일종의 독립적인 금속으로 분류할 수 없다. 트러스 PCM은 작은 셀로 구성된 다층구조를 가지는 것이 유리하기 때문에 와이어를 이용하여 덩어리(bulk) 형태의 다공질 금속을 만든 것은 Sypeck과 Wadley가 제안한 "Microtruss (R)"가 최초이다. 이는 복수의 철망을 적층한 후 브

레이징한 것으로 강도, 열전도 특성이 기존 발포 금속에 비하여 우수한 것으로 보고되었다. 또 복수의 와이어나 튜브를 직조하지 않고 평행하게 배열한 후 교차적층한 후 브레이징한 것도 보고된 바 있다.

그림 1의 (a)와 (b)는 이 두 와이어 기반 다공질금속의 형태를 나타내고 있다. 이 두 가지 금속은 제조가 용이하다는 장점이 있으나 그 강도가 브레이징에 의존하며 방향에 따라 물성이 크게 다르며, 이상적인 트러스 구조가 아니기 때문에 강도가 낮은 문제가 있다. 그림 1(c)는 최근 "Strucwire"라는 이름으로 제안된 것으로 스프링 형태로 성형된 와이어를 서로 회전삽입하여 엮은 것이다. 다층형태로도 쉽게 조립할 수 있고 최소한의 브레이징을 통하여 고정된다. 그러나 이 구조는 굴곡이 심한 와이어로 구성되어 무게대비 강도 및 강성이 매우 낮다.

이상의 논의로부터 와이어기반 다공질금속이 우수한 특성을 갖기 위해 가져야 할 조건을 나열하면 다음과 같다.

- 이상적인 트러스 구조
- 최소의 와이어 굴곡
- 최소량의 용가재(filler metal)로 브레이징
- 용이한 3차원 직조

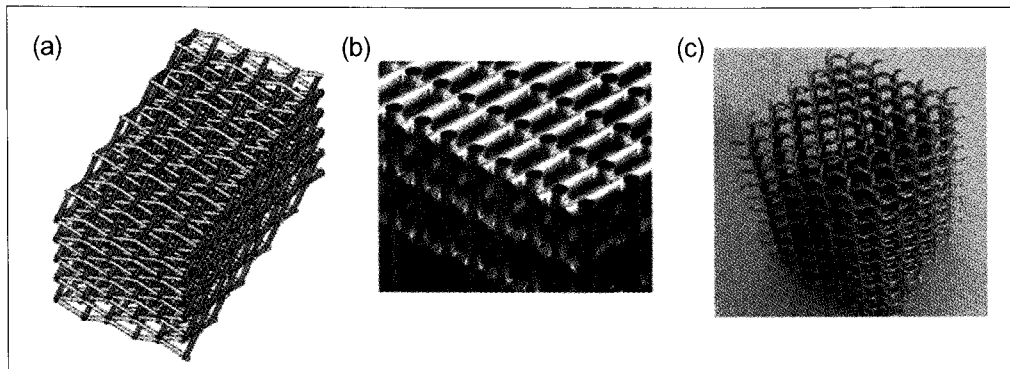


그림 1 (a) Microtruss®, (b) Hollowtruss, (c) Strucwire®

이 글에서는 이상의 요구조건에 부합하도록 본 저자의 연구실에서 개발된 몇 가지 직조금속 즉, 와이어로 직조된 다공질금속을 소개하고 그 특성과 응용 및 향후 개발방향에 대하여 기술하였다.

직조금속의 종류

복합재료의 경우 3~5축 방향의 섬유다발(yarn)을 3차원 직조하는 기술이 개발되어 있다. 주로 전통적인 방직기법을 발달시킨 것으로서 복잡한 기구학적 장치를 통하여 사전에 평행으로 배치된 복수의 섬유다발을 상호 교차하며 개구부를 만들고 새로운 섬유다발을 투입하는 과정을 반복하여 제조한다. 강성의 금속와이어를 이용하여 트러스형 3차원 구조물을 만들기 위해서는 기존의 직조방법은 사용할 수 없다. 따라서 위의 조건에 부합하는 유일한 방법은 먼저 와이어를 나선형으로 성형하고 이를 회전삽입하여 조립한 후 와이어 교차부를 고정하는 것이다. 다만 Strucwire와는 달리 가능한 피치대비 나선반경이 작아 직선에 가까운 형태를 가진 와이어로 구성되어 이상적인 트러스와 유사한 형태를 가져야만 하며, 외부에서 투입한 와이어는 도중에 끊기거나 굴곡되지 않고 구조물 전체를 관통하여야 한다.

그림 2는 저자의 연구실에서 개발된 세 가지 직조금속인 WBC, WBK, WBD의 형태를 나타내고 있다. 동일한 나선반경과 피치를 가

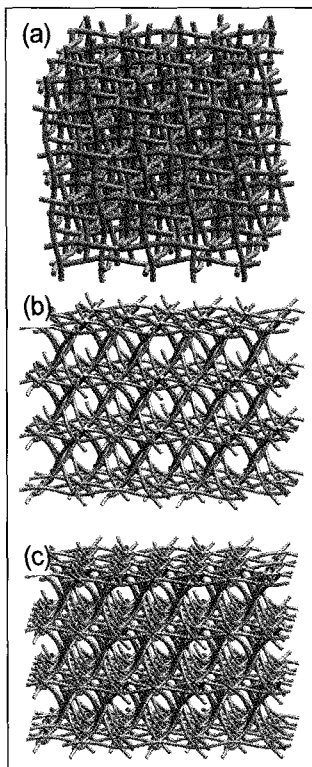


그림 2 세 가지 직조금속 (a) WBC, (b) WBK, (c) WBD

진 나선와이어로 이 세 가지 구조를 제작한다면 밀도비가 대략 3:1:2이며 나선반경의 비는 1:1.15:1.4이다. WBC는 나선반경이 가장 작아 굴곡에 의한 강도저하 또한 가장 낮고 높은 밀도를 실현할 수 있으나 단지 3방향의 와이어 균으로 구성되어 방향에 따른 물성의 변화가 심하다. WBK는 무게대비 강도 및 소성변형 안정성 면에서 가장 우수한 트러스로 알려진 Kagome 트러스와 유사한 형태를 가지고 있어 기계적 특성이 가장 우수하고 6방향의 와이어 균으로 구성되어 방향에 따른 물성의 변화가 적다. 그러나 와이어간의 간섭이 심하여 높은 밀도를 얻을 수 없다. WBD는 기계적 특성은 WBK보다 약간 열등하지만 WBK와 같은 방향에 따른 물성변화가 적으며 2배 높은 밀도까지 제작이 가능하다.

이상의 와이어직조금속 중 WBK가 가장 먼저 개발되어 여러 가지 금속의 적용 가능성과 기하학적 한계에 대하여 조사한 바 있다. 그림 3은 여러 가지 WBK 샘플을 보여주고 있다. 이와 같은 직조금속의 연구과정에서 몇 가지 변종이 고안되었다. 그림 4는 그 예를 나타낸 것으로서 그림 4(a)는 부분충진 WBK로 명명된 것으로 브레이징에 사용되는 용가재(filler metal)를 과다 투입하여 얻을 수 있다. 전체 부피 중 크기가 작은

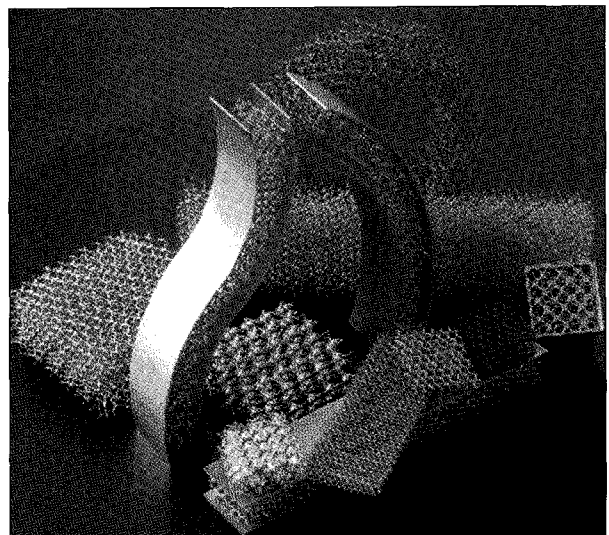


그림 3 여러 가지 직조금속 샘플

정사면체 공간이 용가재로 채워져 밀도가 약간 증가하지만 WBK의 주요파손 원인인 트리스 요소의 좌굴을 원천적으로 방지하여 높은 강도를 얻을 수 있다. 그림 4(b)는 semi-WBK라 명명된 것으로 WBK를 구성하는 6방향의 와이어 군 중 3방향을 나선이 아닌 직선 와이어로 대체한 것이다. 전체 방향이 나선와이어인 경우에는 별도의 외부 지지 구(fixture or frame)가 없어도 와이어 자체가 서로 구속하여 형태를 유지하는 반면에 semi-WBK는 와이어를 지지구가 필요하다는 단점이 있으나 와이어 굴곡으로 인한 강도 및 강성 저하를 최소화 할 수 있다는 장점이 있어 특히 복합재료 와이어를 사용하여 트리스 PCM을 제조할 때 유리하다. 그림 4(c)는 가는 튜브를 이용하여 와이어로 제조할 때와 똑같은 방법으로 WBK를 만든 것으로 한층 더 우수한 무

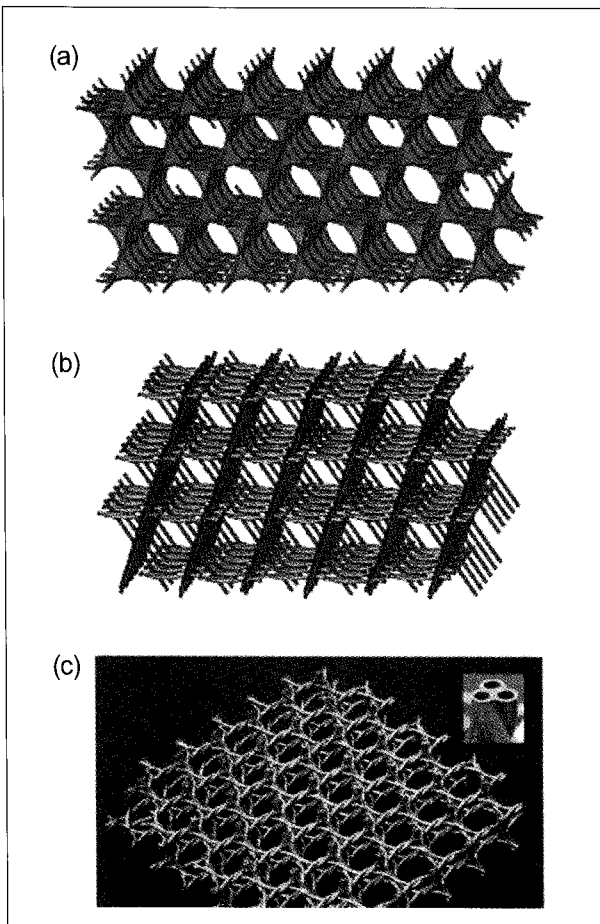


그림 4 WBK의 변종들: (a) 부분충진 WBK, (b) semi-WBK, (c) 튜브 WBK

게대비 기계적 특성을 얻을 수 있으며 가는 튜브를 히트파이프와 같이 유체를 순환하는 용도로 사용하면 하중 지지뿐만 아니라 열전달 매체로도 사용할 수 있을 것으로 보인다.

기계적 물성 및 열유체 특성

그림 5는 직조금속의 압축강도를 다른 다공질 금속과 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 수평축에 표시된 상대밀도(relative density)는 기공률(porosity)과 반대 개념으로 전체 겉보기 부피 중에 와이어가 차지하는 부피를 나타낸다. 수직축은 다공질금속의 강도를 모체의 강도와 상대밀도로 나누어 무차원화한 것으로 모체의 밀도에 관계없이 무게대비 강도의 상대적인 크기를 나타낸다. 상대밀도가 0.05 이하로 낮은 영역에서는 tube WBK가 기존의 다공질 금속 중에서는 가장 우수한 피라미드 트리스 PCM보다 높고, 상대밀도가 0.05 이상인 영역에서는 부분충진 WBK가 hollow truss에 버금가게 우수하다는 것을 알 수 있다. 기타 Mirostruss[®]나 발포알루미늄, 곡판형(eggbox) 금속보다는 월등하게 우수하다.

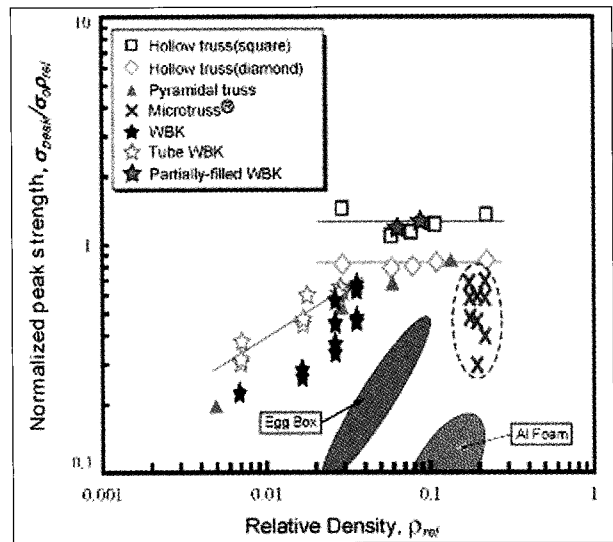


그림 5 여러 가지 다공질 금속의 무차원 압축강도-상대밀도 비교



직조금속을 포함한 열린 셀을 가진 다공질 금속은 내부에 유체를 통과시킬 수 있고 표면적이 넓기 때문에 고효율 열전도 매체로서 응용이 모색되고 있다. 알루미늄 와이어로 제작된 WBK를 포함한 여러 가지 다공질 금속이 강제대류 하에서 나타내는 유동저항 및 열전도 특성을 조사한 바 있다. 다른 트러스형 PCM과 마찬가지로 WBK는 규칙적인 내부 구조를 가지면서 매우 낮은 상대밀도(즉, 높은 기공률)를 갖기 때문에 발포금속에 비하여 수십 분의 일에 불과한 유동저항을 나타낸다. 그러나 열전달 성능은 발포금속에 버금갈 만큼 우수하므로 열전달 매체로서 이상적인 특성을 가진다고 말할 수 있다.

WBK의 열전도 특성도 조사된 바 있는데 상대밀도 5% 정도에서 열전도율이 모재의 1%의 이하에 불과한 것으로 밝혀졌다. 샌드위치 심재로 WBK를 쓰고 내부에 우레탄 폼과 같은 단열재를 투입하면 하중을 지탱하면서도 단열성을 유지할 수 있을 것이다.

응 용

위에서 언급한 WBK의 가벼우면서도 높은 강도와 낮은 유동저항 및 높은 대류 열전달, 낮은 전도율 등의 특징은 WBC, WBD 등 다른 직조금속도 공유할 것이다. 다만 밀도가 다르므로 용도별로 적절한 구조만 선택하면 된다. 직조금속의 이러한 특성을 활용하여 아래와 같은 분야에 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

i) 샌드위치 심재 : 기존에 널리 사용되는 하니컴은 닫힌 셀을 갖기 때문에 내부공간을 활용할 수 없다. 또한 조선구조용으로 많이 사용되는 단일 주름판(single corrugation) 심재는 방향에 따른 물성차이가 너무 큰 문제점이 있다. 다층 구조를 갖는 직조금속은 이상의 문제가 없으며 셀 크기가 작게 할 수 있기 때문에 면적좌굴 억제하고 진동감쇄능력이 우수하며, 균질 물성을 얻을 수 있다. 90% 이상 비어 있는 내부에 유체를 저장하거나, 발포수지를 채워 단열성을 높이거나, 공기를 통과시켜 냉각을 하는 등 다기능성(multi functionality)을 가진 판재를 실현할 수

있다.

ii) 배기가스 정화기 : 저자의 연구팀에서는 직조금속의 우수한 대류열전달 능력이 유체와 와이어 간의 활발한 접촉에 기인한다고 보고 역시 기체와의 활발한 접촉이 필요한 촉매지지체로서의 성능을 조사한 바 있다. Fecralloy® 와이어로 WBK를 조립하고 표면에 백금촉매를 입혀 산화능력을 조사한 결과 현재 자동차용 배기가스 정화기에 사용되는 cordierite와 동등한 것을 발견하였다. 고가의 백금촉매를 훨씬 적은 양을 쓰고 유동저항에 의한 압력손실은 1/50에 불과하며 95% 이상의 기공률과 깨지 않으므로 두꺼운 케이싱이 필요 없어 무게도 가볍다. 또한 우수한 대류열전달 성능 덕분에 배기가스에 의해 단시간에 가열되고 전기저항열로 기존 배기가스 정화기가 갖는 cold start 문제점을 최소화 또는 제거할 수 있다.

iii) 인공뼈 : 최근에는 기존의 고밀도의 티타늄이나 세라믹으로 만들어진 인공뼈를 대신하여 열린 셀의 발포금속이 각광을 받고 있다(본 테마기획의 Dr. Stephani 글 참조). 그것은 주변의 뼈와 강도 및 강성이 유사하여 응력집중현상이 발생하지 않으며 내부에 피가 통하고 뼈조각이 자랄 수 있어 시간이 경과하면 인체와 완전 동화가 될 수 있기 때문이다. 저자의 연구팀에서는 실험적으로 셀 크기 1mm 정도의 티타늄 WBK를 제조하였는데(그림 6), 기공률 96%에 압축강도 15MPa의 성능을 보였다. 같은 강도를 갖기 위해서 티타늄 발포금속은 기공률은 80~90% 정도 되어야 하므로 티타늄 원소재가 많이 소요된다. 기공률이 높으면 가벼울 뿐 아니라 인체 내에서 거부반응을 최소화할 수 있다.

iv) 섬유강화 콘크리트 : 콘크리트는 압축강도에 비하여 인장강도가 낮기 때문에 철근과 함께 사용한다. 최근에는 초고층 빌딩이나 장시간 다리 등에 필요한 높은 인장강도와 경량화를 위하여 잘라진 형태의(chopped) 각종 섬유를 혼합한 섬유강화콘크리트(FRC)가 사용되고 있다. 그런데 콘크리트를 감화하기 위하여 투입된 섬유들이 콘크리트 내에 고르게 분포하지 않기 때문에 강도가 낮아진다는 문제가 있다. 최근

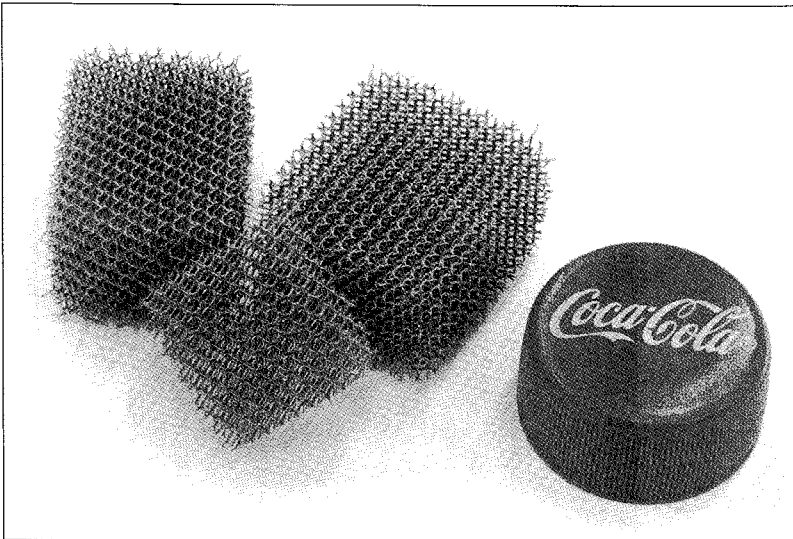


그림 6 인공뼈용 티타늄 WBK

저자의 연구실에서 직경 0.5mm, 인장 강도 2GPa의 강선으로 셀 크기 10mm의 WBK를 조립한 바 있는데 이를 콘크리트의 강화섬유로 사용하면 경량의 고강도 콘크리트를 실현할 수 있을 것으로 판단된다. 물론 내부의 규칙적인 공간에 철근을 투입하여 특정 방향의 강도를 높일 수도 있다.

주) 저자의 직조금속 관련 정보는 홈페이지 www.wire-woven-structures.com 에서 보실 수 있습니다.



기계 용어해설

템플릿(Template)

기계를 설치할 때 기초 콘크리트 시공을 하면서 동시에 기초 볼트를 고정시키는 경우에 철판이나 형틀 또는 판자의 중심 위치에 구멍을 뚫은 후, 각 구멍을 통하여 기초 볼트의 위치를 결정하는 플레이트.

시험하중(Test Load)

재료의 기계적 성질을 조사하는 각종 재료시험 또는 기계부품 및 구조물의 강도시험에서, 피계측물에 가해지는 지정된 크기의 하중.

상대성이론(Theory of Relativity)

빛의 전파속도에 관한 일반적인 특징 또는 그것으로부터 유도되는 시간, 공간, 그 밖의 관측량이 관측자의 운동에 의존하는 상태에 관한 물리이론.

이론수력(Theoretical Water Power)

이론상 낙차와 수량으로 발생시킬 수 있는 수력으로, 수

차에서는 수차에 유입하는 물이 갖는 동력.

열해리(Thermal Dissociation)

열을 가하여 1개의 분자가 그보다 작은 분자, 원자, 이온 등으로 분해되는 것, 또는 상황에 따라서 그 분해가 역행하는 경우의 현상.

열설계(Thermal Design)

원자로의 노심으로부터 최대의 열량을 안전하게 그리고 경제적으로 추출할 수 있도록 노심구조를 결정하는 설계.

열역학적 온도눈금(Thermodynamics Scale of Temperature)

대기압에서의 물의 빙점과 끓는점의 차를 1/100로 한 것을 1K로 쓰며, 현재의 물의 3중점이 273.16K로 되도록 눈금이 정해져 있는 것.