

초경량 금속 구조재 직조장치의 설계 및 제작[§]

김 판 수* · 강 기 주*†

* 전남대학교 기계시스템공학부

Design and Construction of a Loom for Obtaining Ultra-Light Metal Structure

Pan Su Kim* and Ki Ju Kang*†

* School of Mechanical System Engineering, Chonnam Nat'l Univ.

(Received May 17, 2010 ; Revised July 20, 2010 ; Accepted July 22, 2010)

Key Words: Loom(직조기), Ultra-light Metal Structure(초경량 구조물), WBK(Wire-woven Bulk Kagome; 와이어 직조 카고메), PCM(Periodic Cellular Metal; 규칙적 다공질 금속)

초록: 와이어직조 카고메(WBK)는 나선형으로 성형된 와이어를 6 방향에서 조립하여 제작된다. 지금까지의 WBK 는 수작업으로 조립되어 왔지만, 산업적 적용을 위해서는 조립공정의 자동화가 필수적이다. 또한, 유연한 와이어로 WBK 를 제작할 경우 기하학적 형상을 유지할 수 없으므로 직조기와 같은 자동화 기계의 개발이 절실하다. 이번 연구에서는, 유연한 와이어를 이용하여 WBK 를 제작하는 직조기를 설계 및 제작하였다. 이 직조기는 상부 플레이트의 회전운동과 와이어를 삽입하는 장치의 병진운동으로 작동된다. 그리고 이미 삽입된 와이어 간의 간섭을 방지하기 위한 빗살장치는 다층의 카고메망 사이에 위치된다. 또한 이 직조기는 나선형 와이어와 직선형 와이어로 구성된 semi-WBK 의 제작에도 이용될 수 있다.

Abstract: Wire-woven Bulk Kagome (WBK) is fabricated by assembling helically formed wires in six directions. To date, WBK samples have been assembled manually. For industrial application, the assembly process must be automated. Furthermore, if WBK is to be fabricated using flexible wires that cannot maintain their helical shape during fabrication, a specialized automatic machine, i.e., a loom needs to be developed. In this work, we designed and constructed a loom for fabricating WBKs using flexible wires. This loom is operated by one rotation of the upper plate, two translations of the insertion device, and insertion of wires. So-called “comb devices” are placed between multiple layers of Kagome nets to prevent the wires that are already in place from getting entangled with those that are being inserted. This loom can be also used to fabricate semi-WBKs composed of helically formed wires and rigid straight wires.

1. 서 론

초경량 금속 구조는 무게 대비 강도가 높은 재료로서 발포금속, 트러스 PCM 등이 있다. 보편적으로 발포금속은 불규칙한 구조로 인한 열등한 기계적 강도, 높은 가격, 소재의 제한성 때문에 활용성이 떨어지고 있다. 이에 반해 트러스 PCM 은 규칙적인 구조와 내부 공간 활용 가능성, 충격 및 진동, 에너지 흡수율이 뛰어난 재료로 알려져 있다. 이러한 트러스 PCM 을 이루는 구조로는 피라

미드(Pyramid),⁽¹⁾ 옥테트(Octet),⁽²⁾ 카고메(Kagome)⁽³⁾ 등이 있다.

트러스 PCM 을 제조하는 방법⁽⁴⁻⁶⁾에는 인베스트먼트주조법, 철망 적층법, 천공 판재 성형법이 있으나, 높은 제조 비용 및 결함률, 재료 손실 등의 문제점이 발생하여 대량 생산 가능성이 희박하다. 최근 Lee 와 Kang 등⁽⁷⁾에 의해 제안된 Wire-woven Bulk Kagome(WBK) 는 기존의 트러스 PCM 의 장점과 더불어 소재 자체를 쉽게 강화하여 구조재의 강도를 높일 수 있을 뿐 아니라, 다층으로 적층할 수 있다는 이점을 갖고 있다. 하지만 WBK 제작 시 대부분을 수작업에 의존하므로 대량생산 가능성이 낮은 편이다.

[§] 이 논문은 2010년도 대한기계학회 재료 및 파괴부문 춘계학술대회(2010. 4. 22.-23., 라테나콘도) 발표논문임.

† Corresponding Author, kjkang@chonnam.ac.kr

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

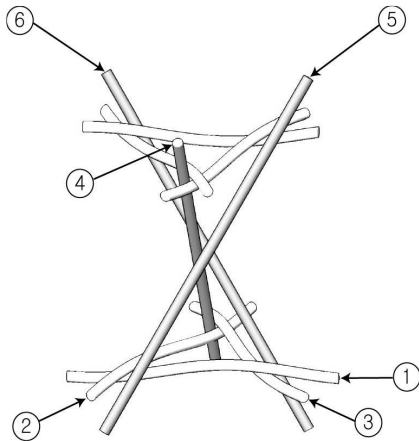


Fig. 1 Unit cell of semi-WBK

WBK 가 경쟁 재료에 비해 다양한 강점을 가지고 있지만, 상업화를 위한 가장 중요한 관건은 대량 생산성이다. 따라서 PC 로 제어되는 WBK 직조 장치를 설계 및 제작할 필요가 있다. 다만, 면내방향(in-plane) 2D 카고메(Kagome) 망의 제조에 필요한 3 축 직조방법으로는 1960 년대부터 다양한 기술이 개발되어 있으므로, 본 연구에서는 면내방향 와이어망은 기존 방법으로 제작할 수 있다고 전제하고, 이것들을 미리 여러 장 구매하여 장착한 뒤 면외방향(out-of-plane) 와이어를 삽입하여 WBK 를 직조하는 장치를 설계 및 제작하였다.⁽⁸⁾

면외방향 직조 과정에서 와이어 간의 간섭을 방지하기 위한 추가적인 장치가 구상되었다. 또한 기존의 WBK 제작에 사용되는 강성의 나선형 와이어를 적용하기에 앞서 유연한 와이어인 면사를 이용하여 제작하였다. 여기서 면사는 가정용 봉제사로써, 직경 1.0mm 정도의 비교적 두꺼운 실이다. 본 장치는 유연한 와이어로 3 축 직조된 Kagome 망과 강성의 직선 와이어로 구성된 semi-WBK⁽⁹⁾의 제조에도 사용될 수 있다. Fig. 1 은 semi-WBK 의 단위셀 형상을 나타내고 있다.

이상의 필요를 충족하기 위해서는 다음과 같은 요구조건을 만족해야 한다.

- PC 제어를 통한 장치의 구동
- 유연한 면사의 공급
- 삽입된 면사의 위치고정
- 면외방향 면사 삽입 시 기 직조된 면사간의 간섭을 방지
- 복합재 섬유변들과 강성의 직선 와이어들을 이용한 직조 가능성

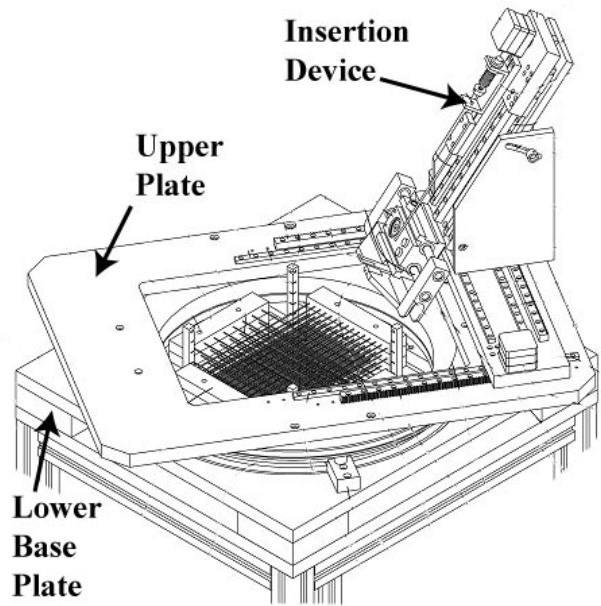


Fig. 2 A system of loom

본 제작장치는 3 차원 트러스 구조물 직조기로서 중앙부가 천공된 하부 베이스 플레이트와 면내에서 회전 가능한 상부 플레이트로 이루어진다. 하부 베이스 플레이트 내부에는 면내방향 와이어망과 간격조절수단이 포함된 빗살장치, 그리고 면사고정상하관 등이 조립되어 있다. 상부 플레이트에는 구동 모터에 의한 전후좌우 이동수단과 일정한 각도에 따른 면사의 삽입장치가 장착되어 있다. 삽입장치는 WBK 면외방향 축의 삽입 각도를 따라 삽입 및 이탈 된다. 이러한 직조기의 전체 모습은 Fig. 2 와 같다. 회전 플레이트와 간격조절수단, 면내방향 이동수단, 삽입장치는 모두 PC 로 제어되며, 본 장치는 3 차원 트러스 구조물을 대량 생산할 수 있다.

2. 직조기의 구조 및 제어

2.1 직조기의 구조

3 축 직조로 이루어진 면내방향 와이어망 4 개가 일정한 간격으로 적층된다. 최상층 와이어망 위에는 면사고정상관, 최하층 와이어망 아래에는 면사고정상관이 결합된다. 각각의 면사고정상하관은 면외방향 면사가 삽입되는 위치마다 직경 3.5mm 의 구멍이 뚫려 있다. 또한 면사의 고정을 위해 1mm 두께의 고무관이 결합되었다. 다음으로 와이어망 중간마다 Fig. 3(a)의 빗살장치 A(comb device

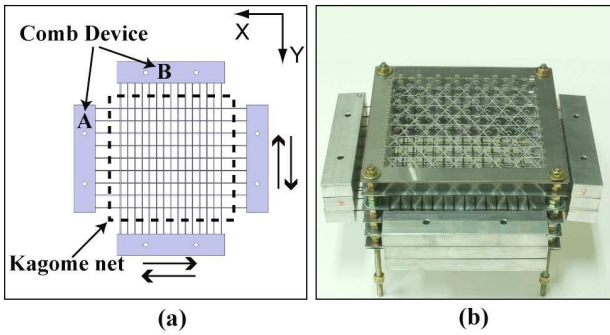


Fig. 3 (a) Set of comb devices A and B (b) multiple layers of 2D Kagome nets



Fig. 4 Insertion device

A)와 빗살장치 B(comb device B)가 직각을 이루며 2 개씩 장착된다. Fig. 3(b)는 조립된 면내방향 와이어망 4 개와 면사고정상하판, 빗살장치 A 3 개, 빗살장치 B 3 개를 조립한 모습으로서 직조다단체라 명하였다. 이렇게 조립된 직조다단체는 하부 베이스 플레이트 내부에 결합한다. 4 층의 와이어망은 하부 베이스 플레이트에 고정되지만, 3 개의 빗살장치 A 와 3 개의 빗살장치 B 는 각각 독립적으로 간격조절이 가능하다. 이 빗살장치의 원리는 2.2 절에서 자세히 기술되었다.

상부 플레이트에는 구동모터에 의한 면내방향 x 축과 y 축 이송장치가 장착되었다. 또한 상부 플레이트 전체가 면내에서 c 축을 중심으로 $\pm 120^\circ$ 회전 가능하다. Fig. 4 는 상부 플레이트 위에 결합되어 있는 삽입장치를 나타내고, 이 삽입장치는 면외방향 와이어의 삽입각도인 $\theta=54.73^\circ$ 에 맞추며, 이 축은 z 축이다. 구동모터에 의해, 삽입장치

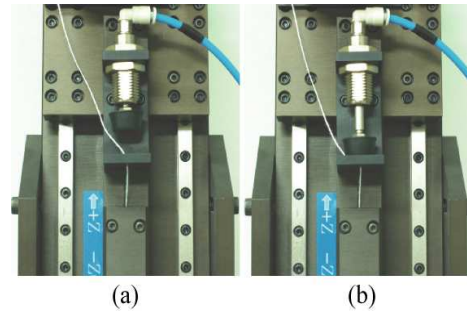


Fig. 5 Wire fixing device on the insertion device, (a) opened (b) closed

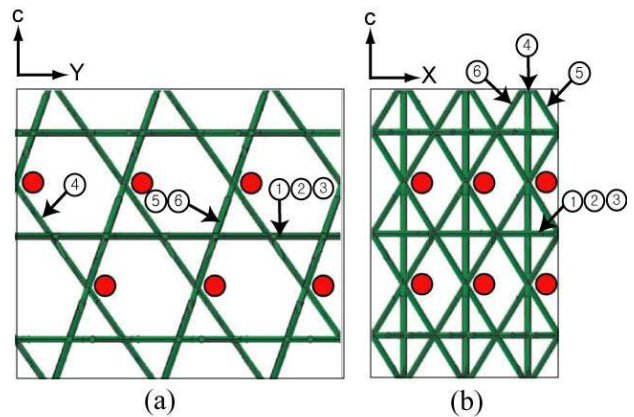
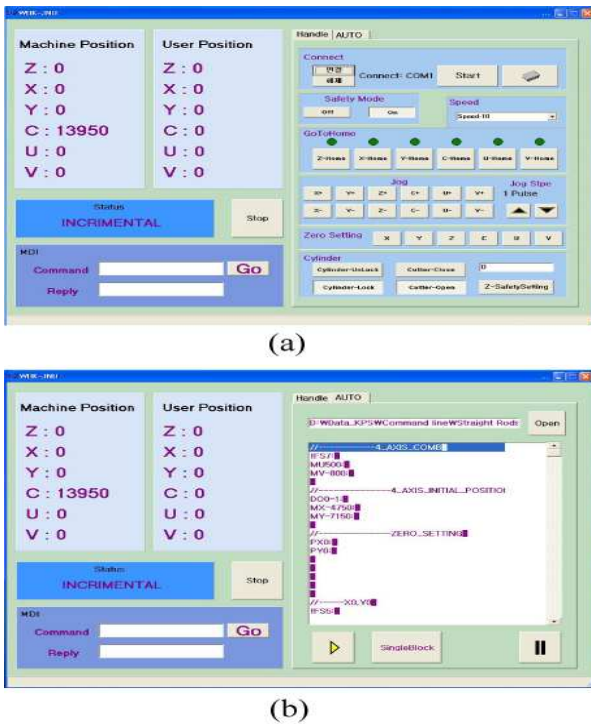


Fig. 6 Locations of comb devices A and B in an ideal Kagome structure, (a) side view (b) front view

에서 z 축을 따라 이송하는 튜브가 있으며, 튜브 내부에는 유연한 와이어인 면사가 포함되어 있다. 삽입장치의 상단에는 튜브로부터 면사의 이탈을 방지하기 위한 면사고정상장치가 장착되어 있다. 이 장치의 역할은 삽입장치가 면내에서 x, y 축으로 이송될 때 튜브내의 면사가 이탈되지 않도록 고정하거나, 삽입장치가 삽입 될 때 튜브와 면사가 함께 삽입되도록 유도한다. Fig. 5 (a)는 면사고정상장치가 공압 실린더에 의해 탈착된 상태이고, (b)는 압착된 상태이다.

2.2 빗살의 원리

면내방향 와이어망을 편의상 1 축, 2 축, 3 축으로 직조된다고 하고, 면외방향으로 삽입되는 면사를 4 축, 5 축, 6 축으로 표현하겠다. 각 축의 방향은 Fig. 1 과 Fig. 6 에 표기하였다. 빗살장치의 역할은 면외방향 삽입 시 기 직조된 면사간의 간섭을 방지하기 위함이다. 먼저, 빗살장치 A 는 적층된 4 개의 와이어망들 사이에 결합되므로 3 단으로 이



(a)

(b)

Fig. 7 (a) A screen view of control software-manual mode (b) A screen view of control software-auto mode

루어져 있다. 빗살장치의 와이어는 직경이 1mm 인 스프링강으로 제작되었으며, 한쪽 단에만 고정되어 이미 적층된 와이어망들 사이에 착탈이 가능하다. Fig. 6 은 Ideal Kagome structure 에서 빗살장치와 이어의 위치를 포인트로 표시하였다.

여기서 빗살장치 A 는 Fig. 6(a)에서와 같이 면의 방향 면사가 교차하여 간섭이 발생하는 지점, 즉 4 축과 5 축의 교점마다 위치하도록 설계되었다. 빗살장치의 원리는 4 번 축이 삽입된 후 빗살장치 A 가 기 삽입된 4 번 축을 밀어내면 5 번 축이 삽입 가능한 공간을 확보하는 원리이다. 이때의 빗살장치 A 의 간격조절 축은 Y 축이다.

빗살장치 B 의 경우도 Fig. 6(b) 에서와 같이 위치하며, 그 원리는 빗살장치 A 와 유사하다. 다만 빗살장치 A 가 4 번 축과 5 번 축 간의 간섭을 방지한다면 빗살장치 B 는 상부플레이트가 +120° 회전한 다음, 5 번 축과 6 번 축 간의 간섭을 방지한다. 이때의 빗살장치 B 의 간격조절축은 X 축이다. 여기서 X 축과 Y 축은 Fig. 6 에 표현하였다.

2.3 PC 제어

빗살장치 X 축과 Y 축의 간격조절, 상부 플레이트의 면내방향 x 축과 y 축의 이동, c 축의 회전, 그

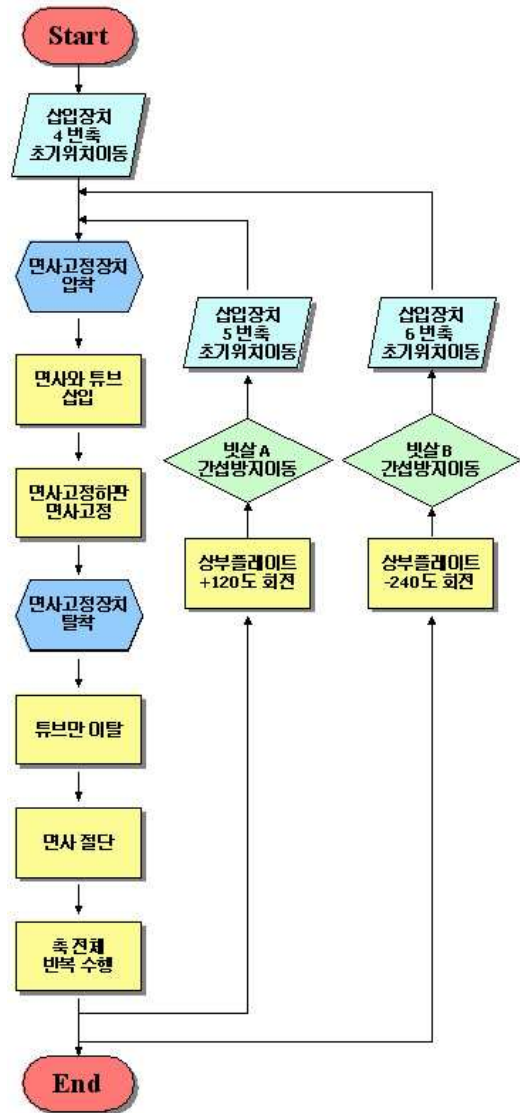


Fig. 8 Flow chart of the loom operation

리고 삽입장치의 면의방향 z 축의 삽입 등 모든 작동은 PC 로 제어된다. 면사고정장치와 커터의 공압 실린더 역시 PC 에 의해 제어된다. 제어 software 는 C++ Builder 로 제작되었으며 Fig. 7 과 같다. Fig. 7(a)는 manual mode 로서 좌측 상단은 각각의 독립좌표와 상대좌표를 나타내고, 하단은 각 축의 위치를 직접 입력 가능한 command 창을 나타낸다. 우측은 각 축의 초기위치, 속도 조절, zero setting 그리고 공압 실린더의 작동 등을 위한 버튼이 있다. Fig. 7(b)는 auto mode 로서 저장된 command 를 불러와 자동제어가 가능한 화면이다. 또한, 병진, 회전, 공압 실린더 작동 등 전반적인 직조기의 모든 공정 과정을 text file 로 저장할 수 있다.

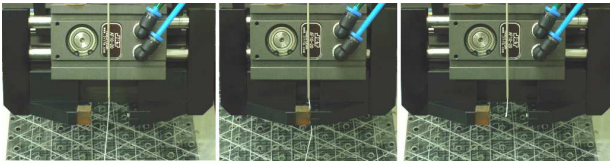


Fig. 9 Process of wire cutting

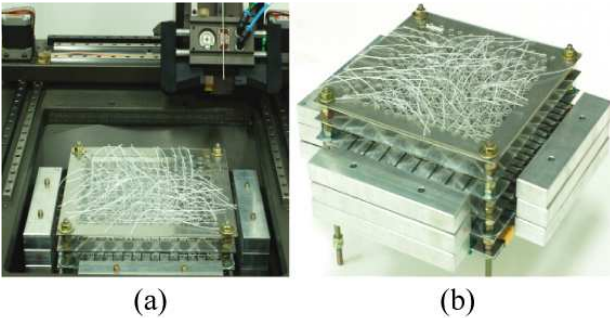


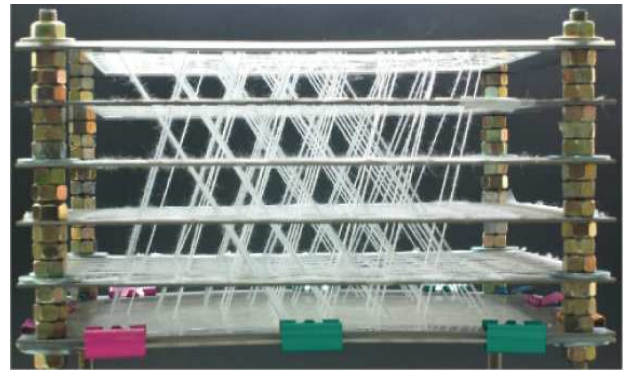
Fig. 10 Assembled WBK sample, (a) in place (b) separated

3. 직조기의 작동방식

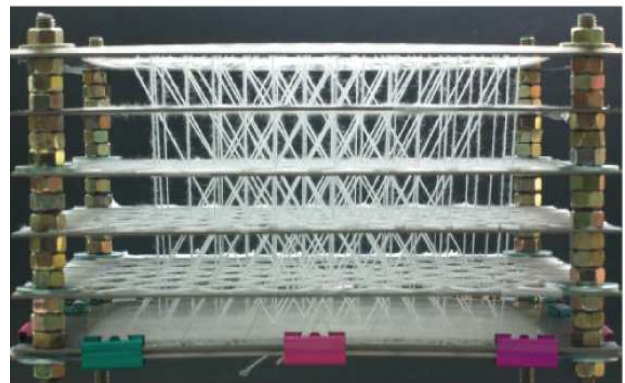
Fig. 8 은 직조기의 작동방식 flow chart 를 나타낸다. 하부 플레이트 내부에는 빗살장치와 면내방향 와이어망을 적층한 직조다단체가 결합된다. 와이어망의 면내방향은 Fig. 1 에서 1 번, 2 번, 3 번 축으로 이루어지고, 면외방향은 4 번, 5 번, 6 번 축으로 이루어진다. 면내 방향은 Fig. 3(a)에서 X, Y 평면과 동일하고, 면외방향은 Fig. 4 에서 x, y 평면에 대해 삽입각도인 θ 만큼 기울인 방향 즉, z 축을 의미한다. 직조기 삽입장치의 튜브는 z 축과 동일한 방향인 4 번 축을 중심으로 $\pm 120^\circ$ 간격으로 5 번 축과 6 번 축을 삽입한다. 시편의 pitch 는 20mm 이고, 크기는 200mm×200mm 이다. 시편의 높이는 4 층이지만, 면사고정상하판을 포함할 경우 6 층의 직조다단체를 이룬다.

직조기의 작동은 면사고정장치에 면사가 압착된 후 삽입장치가 초기 위치로 이송된다. 면사를 포함한 튜브가 4 축을 삽입하고, 삽입된 면사가 면사고정상하판에 고정되면, 면사고정장치가 탈착된다. 면사를 제외한 튜브만 완전히 빠져 나오면 Fig. 9 와 같이 커터가 작동하여 면사를 절단하고, 절단된 면사는 면사고정상하판과 상판에 의해 고정된다. 이러한 과정이 4 번 축 전체에 대해서 반복적으로 수행된다.

4 번 축 직조가 완료 될 경우, 삽입장치는 초기 위치로 돌아온 후 상부 플레이트가 $+120^\circ$ 회전한



(a)



(b)

Fig. 11 The finished WBK sample, (a) a side view (b) a front view

다. 이 때, 이미 직조된 4 번 축과 새로 삽입 될 5 번 축 간의 간섭을 방지하기 위해 빗살장치 A 가 튜브의 직경 이상 이송된다. 5 번 축 역시 4 번 축과 마찬가지로 초기 삽입 위치로 이송된 후 면사를 포함한 튜브의 삽입, 하판 면사고정, 면사를 제외한 튜브의 이탈, 상판 면사고정, 면사 절단의 과정을 동일하게 반복한다. 5 번 축의 직조가 완료 될 경우, 상부 플레이트가 -240° 회전한다. 빗살장치 B 역시 이미 직조된 5 번 축과 새로 삽입 될 6 번 축 간의 간섭을 방지하기 위해 튜브의 직경 이상 이송된 후, 이전과 마찬가지로 6 번 축을 직조한다.

Fig. 10(a)는 직조가 완료된 모습이고, (b)는 하부 플레이트로부터 직조다단체가 탈착된 모습이다. 이상의 과정을 걸쳐 직조다단체로에서 빗살장치 A, B 를 제거하면 Fig. 11 과 같이 완성된 시편을 얻는다.

4. 결론

본 연구에서는 PC 제어를 통한 초경량 금속 구

조제 직조장치를 설계 및 제작하였다. 기존의 WBK 는 강성의 나선형 와이어를 이용하였지만, 이 장치는 우선적으로 유연한 면사를 이용하였다. 먼저, 면외방향 면사 간의 간섭을 방지하기 위한 빗살장치, 면사고정상하판 등 직조다단체를 제작하였다. 이 외에도 삽입장치에 장착된 면사고정장치, 면사절단장치 등을 제작하였고, 모든 직조기의 동작은 PC 를 통해 제어된다.

이 직조기는 무게 대비 강도가 높은 트러스 PCM 중에서 WBK 를 대량생산하기 위한 장치이다. 특히, 유연한 면사를 이용함으로써 고강도 복합재료 구조체의 제작 가능성이 예상된다. 또한 상부 플레이트 삽입장치의 단순한 개조만으로도 강성의 나선형 와이어를 갖는 회전삽입장치를 구상할 수 있다. 그 경우, 유연한 면사가 아닌 강성의 나선형 와이어로 이루어진 WBK 도 제작 가능하리라 기대된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 국가지정연구실사업 (R0A-2006-000-10249-0)의 지원을 받아 수행하였습니다.

참고문헌

- (1) Zok, F. W., Waltner, S. A., Wei, Z., Rathbun, H. J., McMeeking, R. M. and Evans, A. G., 2004, "A Protocol for Characterizing the Structural Performance of Metallic Sandwich Panels: Application to Pyramidal Truss Cores," *Int. Journal of the Solids and Structures*, Vol. 41, pp. 6249~6271.
- (2) Deshpande, V. S., Fleck, N. A. and Ashby, M. F., 2001, "Effective Properties of the Octet-Truss Lattice Material," *Journal of the Mech. Phys. Solids*, Vol. 49, pp. 1747~1769
- (3) Hyun, S., Karlsson, A. M., Torquato, S. and Evans, A. G., 2003, "Simulated Properties of Kagome and Tetragonal Truss Core Panel," *Int. Journal of the Solids and Structures*, Vol. 40, pp.6989~6998
- (4) Wadley, H.N.G, 2006, "Multifunctional Periodic Cellular Metals," *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A*, Vol. 364, pp. 31~68.
- (5) Chiras, S., Mumm, D. R., Wicks, N., Evans, A. G., Hutchinson, J. W., Dharamasena, K. Wadley, H. N. G. and Fichter, S., 2002, "The Structural Performance of Near-Optimized Truss Core Panels," *Int. Journal of the Solids Structures*, Vol. 39, pp. 4093~4115.
- (6) Sypeck, D. J. and Wadley, H. N. G., 2001, "Multifunctional Micro truss Laminates: Textile Synthesis and Properties," *Journal of the Mater. Res.* Vol. 16, pp. 890~897
- (7) Kang, K. J., Jeon, G. P., Nah, S. J., Ju, B. S. and Hong, N. H., 2004, "A New Way to Manufacture Ultra Light Metal Structures," *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. A-28, pp. 296~303
- (8) Kang, K. J. and Lee, Y. H., 2005, "Three-Dimensional Cellular Light Structures Directly Woven by Continuous Wires and the Manufacturing Method of the Same", *US Patent Pending* (Application 10/578,421).
- (9) Lee, B. C., Byeun, J. H. and Kang, K. J., 2010, "Mechanical Behaviour of Truss Cores Fabricated of Composite Wires Under Compression Test," *Spring Conference of KSME*, pp. 38~43.