카고메 트러스로 보강한 콘크리트 부재의 전단 보강효과에 관한 기초 연구

Pilot Study on the Shear Strengthening Effect of Concrete Members Reinforced by Kagome Truss

김 우* · 강기주** · 이기열***

Kim, Woo · Kang, Ki-Ju · Lee, Gi-Yeol

Abstract

There is mounting recognition among concrete researchers that fiber reinforcement makes up for the inherent weakness in resisting tensile force of structural concrete. In practice of application of the fiber to concrete, however, several problems still remain to solve for assuring a uniform mix quality. The Kagome truss that is widely used in mechanical engineering field seems to be a good replacement for the steel fiber. This paper presents the test results of a pilot study for the concrete members reinforced by Kagome truss which is a periodic cellular metal of wire-woven. Three types of Kagome truss bulk were pre-fabricated and filled with normal concrete to make small-scaled test beams. The beams reinforced by a normal steel stirrups were also tested up to failure to compare the behavioral results. From the results obtained, it is appeared that comparing with beams reinforced by normal stirrups, the beams reinforced by Kagome truss showed better performance in load carrying capacity as well as ductility. Therefore, the Kagome truss is proved to be a good web shear reinforcing material.

Keywords : fiber reinforced concrete, kagome truss, ductility, reinforced concrete beam, shear

요 지

콘크리트는 재료적으로 인장에 취약하고 변형에 취성이 크다는 태생적 단점을 갖고 있다. 콘크리트 조직에 인장에 강한 작은 섬유를 혼합한 섬유보강콘크리트는 이러한 취약점을 보완할 수 있는 좋은 방법으로 간주되었으며, 많은 종류의 섬유 재료와 방법들이 제안되었다. 그러나 이 섬유보강콘크리트에도 아직까지 해결하지 못한 문제로서 균질한 배합이 힘들고 높은 체적비를 갖는 섬유 혼입의 어려움 등이 있다. 최근에 새로운 개념의 규칙적 다공질 금속(periodic cellular metal)이 개발되어 기계 분야에 많이 적용되고 있는 철선으로 직조된 카고메 트러스가 있다. 이 논문은 기존 강섬유보강콘크리트의 현실적 문제점을 해결하기 위한 방법의 일환으로 카고메 트러스의 적용 가능성을 검토하기 위한 기초 실험 연구 결과를 정리한 것이다. 3종류의 카고메 트러스로 보강된 실험체와 동일한 채원의 수직스터럽으로 보강된 보 실험 결과와 비교하였다. 그 결과, 카고메 트러스 보강 실험체에서는 강도와 연성이 보통 스테럽 보강 보 보다 더 우수한 결과를 나타냈으며, 복부 보강재로서 우수한 기능을 할 수 있는 것으로 판명되었다.

핵심용어 : 섬유보강콘크리트, 카고메 트러스, 연성, 철근콘크리트 보, 전단

1. 서 론

콘크리트는 지구상에서 가장 많고 쉽게 구할 수 있는 광물로 구성되어 있기 때문에 매우 경제적인 건설 재료로 평가되고 있으며, 지난 한 세기 동안 인류의 문명을 변화시키는데 크게 기여했다. 그런데 이 콘크리트는 재료적으로 몇 가지 단점을 갖고 있는데, 그 중의 대표적인 것이 인장에 취약하고 변형 능력이 적은 취성 재료라는 사실이다. 따라서 콘크리트 조직에 인장에 강한 작은 섬유를 혼합한 섬유보강

콘크리트는 이 취약점을 보완할 수 있는 좋은 방법으로 간주되었으며, 지난 30여년 동안 많은 종류의 섬유 재료와 방법이 제안되었다.

현재까지 가는 철선으로 제작한 강섬유(steel fiber)를 혼입한 강섬유보강콘크리트가 가장 많이 사용되고 있다. 보통 콘크리트에 강섬유를 배합하면 직접적으로 인장강도가 증가할 뿐만 아니라 균열 발생 후에도 균열 열림을 효과적으로 억제한다(양인환 등, 2010; 원종필 등, 2007). 이 때문에 건조 수축과 수화열에 의한 균열 발생을 제어할 수 있어서 메트

*정회원 · 전남대학교 토목공학과 교수 (E-mail : wkim@jnu.ac.kr)

**전남대학교 기계시스템공학부 교수 (E-mail : kjkang@nu.ac.kr)

***정회원 · 교신저자 · 순천제일대학교 토목과 전임강사 (E-mail : gylee@sunchon.ac.kr)

기초 등과 같은 메스콘크리트의 시공성과 내구성이 향상되는 것으로 나타났다. 더욱이 미리 제작되어 운반하는 프리캐스트 제품의 국부적 파손을 방지할 수 있으며, 반복 피로 하중에 대한 저항능력이 크게 향상되는 것으로 알려졌다.

최근에는 강섬유보강콘크리트의 인장 성능 향상이 구조설계기준에서 채택되어 실제 구조물에 안정적으로 사용할 수 있게 되었다. 대표적인 예로서 미국의 ACI 318-08 설계기준(ACI, 2008)에서는 프리스트레스트 콘크리트 부재의 최소 전단철근을 강섬유로 모두 대체할 수 있는 규정이 채택되었다. 이 규정에 의하면 체적비 0.75 퍼센트 이상의 강섬유를 배합한 콘크리트 부재에서는 최소전단철근을 배치하지 않아도 된다고 규정하였다. 또한, 유럽의 fib Model Code 2010(fib, 2010)에서는 강섬유를 혼합한 콘크리트 부재의 휨 인장강도를 반영하여 설계휨강도를 산정할 수 있는 규정을 신설하였다. 이처럼 강섬유보강콘크리트의 사용이 점차 확대되고, 그에 따른 기준화가 빠르게 진행되고 있는 실정이다.

그런데, 강섬유보강콘크리트는 몇가지 시공상 문제점을 갖고 있다. 그 첫번째가 강섬유의 균질한 배합을 안정적으로 확보할 수 있는 배합 기술에 한계가 존재한다. 이러한 시공성을 개선하기 위한 여러 종류의 배합기가 개발되었으나, 근본적으로 문제를 완전하게 해결해 주지는 못하는 실정이다. 이러한 이유로 앞에서 기술한 ACI 설계기준의 최소전단철근 대체 강섬유 혼입 체적비가 0.75 퍼센트인 높은 값으로 규정되어 있다. 두번째는 역학적으로 강섬유보강콘크리트 구조에서 균열 발생 후 경화(hardening) 효과를 발현하는데 한계가 있다는 문제이다. 그림 1에 보인 것처럼, 보강재를 혼입한 콘크리트가 인장을 받을 때 균열 후 거동을 크게 경화(hardening)와 연화(softening) 현상으로 구분된다.

역학적으로 경화 효과를 갖고 있는 경우에서만 응력 또는 변형의 재분배가 가능하고, 그렇지 않는 경우, 즉 연화 현상이 나타날 때는 항복 또는 균열 면에 변형이 집중되어 구조적 기능이 취약해진다. 그런데 강섬유보강콘크리트에서 이러한 경화 효과는 혼입 강섬유 체적비가 일정값 이상을 초과

할수록 증가하는데, 현실적으로 1 퍼센트 이상의 강섬유를 혼입시키기가 어려우며, 2-3 퍼센트 혼입은 매우 어려운 실정이다. 이 때문에 강섬유보강콘크리트의 장점을 구조적으로 활용하는데 큰 제약이 존재한다.

최근에 새로운 개념의 규칙적 다공질 금속(periodic cellular metal; PCM)이 개발되어 기계 분야에 많이 적용되고 있다. 이 다공질 금속은 그림 2와 같이 직경이 가늘고 긴 철선으로 직조된 규칙적인 입체 트러스 단위로 구성되어 있으며, 트러스의 강재 질량에 비하여 강도와 강성이 허니컴(honey comb) 구조체 만큼이나 우수하여 차세대 구조 재료로 주목받고 있다(이용현 등, 2008). 이러한 트러스 구조에는 피라미드(pyramid), 옥테트(octet), 카고메(Kagome) 등이 개발되어 있다(이용현 등, 2007). 이 중 카고메 트러스는 강성이 큰 옥테트와 비슷하나 단위 셀을 구성하는 트러스 요소의 길이가 짧아서 극한한계상태에서의 좌굴에 대한 저항 성능이 훨씬 우수하다. 또한 입체 트러스가 작은 사각형과 큰 팔각형으로 구성되어 있으므로 내부 공간이 크고 등방성이 크게 된다.

이 트러스 다공질 구조체의 제조 방법에는 주조법, 철망적층법과 천공판재 성형법이 있으나, 모두 높은 가격이었으며, 주조 금속의 취성과 천공 때 재료 손실 등의 많은 어려움이 있었다. 그런데 최근에 국내에서 강기주 등(김판수 등, 2010)이 가는 철선을 이용하여 용접이나 별도의 이음 방법을 사용하지 않고 섬유처럼 직조하는 새로운 방법을 개발하여, 카고메 트러스의 제작 원가를 현실적 수준으로 낮췄다.

이 입체 트러스는 자체만으로도 우수한 구조재 성능을 갖고 있지만, 기계 분야에서는 이들 트러스 양면에 강판을 접착하여 샌드위치 판재로 사용하고 있다. 만약 이 입체 트러스를 콘크리트에 충전 한다면 등방성과 균질성이 확보된 다른 형태의 보강콘크리트가 될 수 있을 것이며, 강섬유보강콘크리트의 실제적 한계를 극복하는 좋은 대체 방법일 것이 될 것이다. 따라서 이 연구는 다공질 금속으로 제작된 카고메 트러스를 콘크리트 구조물의 보강재로서 적용 가능성을 조사하기 위하여 기초적인 부재 실험을 수행한 것이다. 실험체는 콘크리트 배합 전에 소요 보강량에 해당하는 카고메 트러스를 미리 제작하여 거푸집 안에 배치한 후 콘크리트를 타설하였다. 이러한 공정은 높은 혼입비를 갖는 강섬유보강콘크리트 구조의 실제적 제작의 어려움을 극복할 수 있으며, 보강콘크리트의 균질성을 확보할 수 있을 것이다.

2. 카고메 트러스

그림 2는 이 연구에서 사용하는 카고메 트러스의 구조를 나타낸 것이다. 트러스는 3방향의 연속된 철선이 서로 교차

그림 1. 철근콘크리트 인장 부재의 균열 후 연화 및 경화 거동

그림 2. 카고메 트러스 (a) 와이어 직조 카고메 평면 구조 (b) 와이어 직조 카고메 입체 구조 (c) 4면체 단위 셀 및 이상화 (d) 8면체 단위 셀 및 이상화

하도록 3축 직조(triaxial weaving)하여 만든 카고메 구조이다. 그림 2(a)에 보인 카고메 평면은 모두 삼각형과 육각형으로 구성되어 있다. 그림 2(b)에 보인 것처럼, 2차원 카고메 평면을 3차원으로 확장하면 6방향의 철선이 서로 교차하면서 규칙적인 다공질 금속 물체를 형성하게 되며 역학적으로도 매우 안정된 구조가 된다. 즉 카고메 평면에서 두개의 마주치는 삼각형은 그림 2(c)와 같이 3차원에서는 4면체가 서로 꼭지점을 맞대고 있는 형태가 된다. 따라서 입체 카고메트러스의 단위셀은 그림 2(d)와 같이 정 4면체와 8면체가 순차하여 6방향으로 배열된 형상이 된다.

그림 2(c)에 보인 것처럼 트러스를 구성하는 모든 요소는 직선으로, 요소들의 교차점은 힌지 절점으로 이상화하여 밀도(density) 또는 체적비(Volume ratio, V_f)를 트러스 단위셀이 차지하는 전체 부피에 대한 트러스 요소가 차지하는 부피의 비는 다음과 같이 나타낼 수 있다(이용현 등, 2008).

$$V_f = \frac{3\sqrt{2}\pi(d_w)^2}{8a^3} \quad (1)$$

여기서 d_w 는 요소 철선의 직경(mm)이고, a 는 절점과 절점 사이 요소 길이(mm)이다.

3. 실험

3.1 실험체

이 연구의 주요 목적인 보통의 철근으로 구성된 전단보강 철근의 대체재로써 카고메 트러스의 적용 가능성을 조사하기 위해 총 7개의 소축적 모형 보를 제작하여 3점 하중 휨 실험을 수행하였다. 현 단계에서는 카고메 트러스 제작의 어려움 때문에 그림 3에 보인 것과 같이 연철선(ductile wire)으로 된 카고메 트러스를 3개 제작하였으며, 그 제원은 표 1에 정리하였다. 이렇게 미리 제작한 트러스의 각 단위는 정

그림 3. 카고메 트러스 형상 (a) 정면도 (b) 측면도

4면체와 8면체 조합 형상으로 단위 깊이 h_t 가 35 mm로 되어 있어서, 타설시 콘크리트의 침투가 용이하도록 제작된 것이다(그림 2(c) 참조).

이 카고메 트러스의 하단에 일반 이형철근을 주철근으로 배치한 후 콘크리트를 타설하여 그림 4에 보인 것과 같은 실험체를 제작하였다. 3개 형식의 카고메 트러스와 각기 동일한 질량의 스티럽으로 전단보강한 보 및 전단보강철근이 없는 기준보를 동시에 제작하여 전단 보강효과 분석에 사용하였다.

표 2에 정리한 것과 같이, A-계열 실험체는 2개의 보(KRB2A, SRB2A)로 구성되어 있으며, 전단경간 대 유효깊이의 비 a/d 가 3인 보이며, 동일한 질량 661 g의 강재가 서로 다른 형태 즉, 수직스티럽 및 카고메 트러스로 복부가 보강되어 있으며, 동시에 일반 이형철근을 휨인장철근으로 보 하단에 배치하였다. A-계열과 B-계열에 사용한 카고메 트러스는 그림 3과 같으며, 단면은 35 mm 크기의 단위셀 6개로 구성되어 있으며 길이는 1,000 mm이다. A-계열에 사용한 카고메 트러스의 철선은 직경이 1.0 mm이고, 항복강도는 350 MPa, 체적비는 0.55%이다.

표 1. 카고메 트러스 제원 및 재료 특성

Kagome Truss Type	Dimension (mm)	Metal wire diameter (mm)	Ultimate stress (MPa)	Weight (g)	Volume ratio (%)
Type I	100 × 150 × 1,000	1	350	661	0.55
Type II	100 × 150 × 1,000	2	340	1,839	1.52
Type III	140 × 260 × 1,000	2	340	2,680	1.10

그림 4. 실험체 제원 (a) A-계열 및 B-계열 보(표 2. 참조) (b) C-계열 보

표 2. 실험체 제원 및 실험 결과

Specimen ¹⁾	Geometry			Reinforcement			Test results					
							Measured load			Deflection		Failure mode ³⁾
	b (mm)	d (mm)	l (mm)	Tension		Shear	Shear cracking load P_{cr} (kN)	Yielding load P_y (kN)	Ultimate load P_u (kN)	Δ_y (mm)	Δ_{max} (mm)	
				Steel	Steel ratio							
CNB2	100	120	1,000	2-D13	0.021	/	39	/	44.2	/	7.7	S
KRB2A				2-D13		Type I	58	54.9	60.3	2.45	25	F
KRB2B				2-D13		Type II	51	60.6	70.0	3.22	23	F
KRB3C	140	230		4-D19	0.036	Type III	145	/	241.3	/	11.1	S
SRB2A	100	120	1,000	2-D13	0.021	661 g ²⁾	46	57.9	63.2	3.33	15.7	F
SRB2B				2-D13		1839 g	52	53.6	62.0	2.45	20.4	F
SRB3C	140	230		4-D19	0.036	2680 g	133	/	212.3	/	10.6	S

Note)

1) Specimen notation

CNB : Control Normal Beam, KRB : Kagome Truss Reinforced Beam, SRB : Steel wire Reinforced Beam

2 : Steel Ratio 0.021(2.1%), 3 : Steel Ratio 0.036(3.6%)

A : Kagome Truss Type I, B : Kagome Truss Type II, C : Kagome Truss Type III (표 1. 참조)

2) Steel wire weights are same as the each Kagome Truss type

3) F : Flexural failure, S : Shear failure

표 3. 콘크리트 배합설계

Design strength f_{ck} (MPa)	W/C	S/a (%)	Slump (mm)	Unit weight (kg/m ³)				Test strength (MPa)	
				Water	Cement	Sand	Gravel	Compression	Splitting tensile
24	0.6	45	150	229	385	810	991	23.2	2.1

B-계열은 A-계열 실험체와 제원과 보강 방법이 동일한 2개의 보로 구성되었으며, B-계열에 사용한 카고메 트러스는 직경이 1.98 mm이고, 항복강도는 340 MPa인 철선으로 제작하였으며, 그 체적비는 1.52%이다. A-계열과 B-계열 시험 결과를 비교하기 위해 복부 보강이 없고 휨철근량이 같은 기준보 CNB2를 동일한 제원으로 제작하였다. C-계열은 전 단경간 대 유효깊이 비가 1.5인 짧은 보 2개로 구성하였으며, 표 1에 정리한 Type III의 카고메 트러스로 복부를 보강하였고, 다른 보는 동일한 질량의 수직스터럽으로 복부 보강하였다. 각 실험체의 기하적 치수는 그림 4에 보인바와 같다.

3.2 재료

실험체 제작에 사용된 콘크리트의 압축강도는 23.2 MPa이고, 슬럼프는 150 mm이며, 최대치수 19 mm의 굵은골재를 사용하였다. 콘크리트 배합설계 및 강도시험 결과를 표 3에 정리하였다. 각 실험체에 배치한 주철근은 420 MPa의 항복강도를 갖는 일반 이형철근을 사용하였다. 카고메 트러스 보강 보와 동일한 복부 보강량이 되도록 직경이 4 mm인 철선을 폐합스터럽으로 제작하여 사용하였으며, 이 철선의 항복강도는 320 MPa이다(표 4. 참조).

3.3 실험방법

그림 5에 보인 것과 같이 실험은 3점 하중 재하로 유압 잭을 사용하였다. 하중 재하에 따른 작용하중의 크기와 경간 중앙의 처짐은 500 kN 용량의 로드셀과 50 mm 용량의 전기식변위계를 통하여 자동신호처리장치에 의해 자동 판독

표 4. 강재의 재료 특성

Reinforcement Type		Nominal diameter (mm)	Cross-sectional area (mm ²)	Yield stress (MPa)	Ultimate stress (MPa)
Tension (Deformed bar)	D13	12.7	126.7	423	615
	D19	19.1	286.5	431	627
Shear (Steel wire)		4	12.6	320	440

그림 5. 실험 전경

과 기록이 되도록 하였으며, 균열 발생과 진행 과정은 실험체 표면에 직접 표시하여 기록하였다.

4. 실험 결과

4.1 균열 거동과 파괴 형상

실험에서 측정한 파괴강도는 표 2에 제원과 함께 정리하였으며, 각 계열별로 작용 하중과 경간 중앙 처짐 관계 및

그림 6. A-계열 보의 균열 형상

관찰된 균열 형상을 그림 6에서부터 그림 11까지 비교하여 나타냈다. 모든 실험체에서 휨균열의 발생과 진전 과정은 유사하였다. 작용하중의 증가에 따라 보의 경간 중앙 부근에서 휨균열이 발생하였다. 하중이 더욱 증가함에 따라 휨균열이 양쪽 지점으로 확장되면서, 어떤 하중에서 보의 경간 중앙부 근처에서 전형적인 경사 전단균열이 급작스럽게 나타났다. 모든 실험체에서 전단균열 발생 순간까지의 과정은 거의 유사하였다. 그러나 전단균열 발생 이후의 균열 진전 과정은 보의 복부 보강 형태와 보강량에 따라 달랐으며, 이에 따른 하중-처짐 거동이 각각 다르게 나타났다.

체적비 V_f 가 0.55%인 카고메 트러스로 복부 보강한 보 KRB2A와 전단보강철근비 0.5%인 수직스터럽으로 보강한 보 SRB2A의 A-계열 실험체와 복부 보강이 전혀 없는 기준보 CNB2에서 관찰된 균열 형상을 그림 6에 나타냈다. 휨균열 발생 형태와 경사 전단균열의 형태에는 차이를 구별하기 어려울 정도로 유사하다. 그러나 그림 7에 보인 하중-처짐 곡선에는 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 복부 보강이 없는 기준보는 전단균열 발생과 동시에 순간 파괴에 도달하는 전형적인 취성적 전단파괴 형태를 보였다. 반면에, 복부 보강한 두 보에서는 전단균열 하중이 약 10 kN 정도 큰 55 kN이었으며, 균열 발생 후에 완전한 소성 거동으로 큰 연성을 발휘하다 극한상태에 도달하였다. 극한 상태는 위험 전단균열이 확장되면서 최대 휨모멘트 점인 하중점 단면의

압축콘크리트 영역이 감소하여 압괴(crushing)가 발생하는 전단-압축 파괴(shear-compression failure) 형태였다.

특히, 이 A-계열 두 보의 하중-처짐 곡선을 비교해 보면 차이를 발견할 수 없을 정도로 동일하다는 것을 관찰할 수 있다. 다만, 마지막 파괴 순간인 극한 상태에서 카고메 트러스 보강 보가 더 큰 연성능력을 갖고 있는 것으로 나타났다. 두 보 모두에서 중앙 경간 처짐이 15 mm에 도달할 때 위험 전단균열을 지나는 복부 보강재의 파단이 시작하였다. 그런데 스테럽 보강 보에서는 스테럽 파단 시작과 동시에 부재의 극한상태에 도달하였지만, 카고메 트러스 보강 보에서는 파단되지 않는 나머지가 지속적으로 저항하고 있어 처짐이 21 mm에 도달할 때 극한상태에 도달하였다.

B-계열 실험체는 체적비 V_f 가 1.52%인 카고메 트러스로 복부 보강한 보 KRB2B와 전단철근비가 1.5%인 수직스터럽으로 보강한 보 SRB2B로 구성되어 있다. 이 B-계열 실험체와 기준보 CNB2의 하중-처짐곡선을 그림 8에 나타냈다. 이 B-계열 보 역시 전단균열 하중에 도달하기 전까지는 앞에서 설명한 A-계열 보와 동일한 선형 탄성 거동을 나타냈다. 그리고, 전단균열 하중의 크기도 A-계열 보와 거의 비슷하였는데, 큰 특징은 카고메 트러스 보강 보의 균열하중이 스테럽 보강 보와 비교하여 약 8 kN 증가하였다는 점이다. 전단균열 강도가 증가하는 현상은 A-계열에서도 미소하게 나타났다지만, B-계열에서는 현저하게 나타나고 있다.

이러한 현상은 카고메 트러스의 우수한 균질 등방성(homogeneous-isotropy)에 의해 복부 위험 전단균열 발생 전 단계에서부터 응력 및 변형의 재분배 기능이 발휘되었기 때문으로 파악된다. 이 사실은 그림 9의 균열 형상에 보인 것과 같이 카고메 트러스로 보강된 보 KRB2B에서 많은 수의 균열이 좁게 발생한 것으로부터도 같은 결론을 추론할 수 있다.

그림 8에 보인 B-계열 두 보의 하중-처짐 곡선을 살펴보면, 경사 전단균열 발생 후에 곡선이 위쪽을 향하는 약간의 경화 거동을 보이는데, 카고메 트러스 보강 보에서 비교적 현저하게 나타나고 있다. 이 보도 A-계열 보와 동일한 처짐 15 mm에 도달하여 복부 보강재가 파단을 시작하였으며 그 후에는 하중 저항 능력이 파단 철근량에 해당하는 만큼 감소한 상태로 나머지 보강재가 기능을 발휘하면서 연성을 유지하였다. 종국에는 위험 전단균열이 휨압축 영역까지 진행

그림 7. A-계열 보의 하중-처짐 곡선

그림 8. B-계열 보의 하중-처짐 곡선

그림 9. B-계열 보의 균열 형상

그림 11. C-계열 보의 균열 형상

하여 전단-압축파괴 형태로 극한상태에 도달하였다. 반면에, 스티럽 보강 보에서는 A-계열 보와 동일하게 완전한 소성 거동을 관찰할 수 있으며, 높은 전단보강 철근비로 인해 스티럽의 파단 또는 항복이 극한상태까지 나타나지 않았다. 이로 인해 위험 전단균열이 압축 영역까지 진행하지 않았으며, 결국 큰 연성을 갖는 휨파괴로 극한상태에 도달했다. 이처럼 B-계열의 두 보의 역학적으로 거의 동일한 정도의 큰 복부 보강비를 갖고 있음에도 불구하고, 극한상태의 파괴 형상이 크게 다르게 나타나고 있다.

C-계열 실험체는 전단경간 대 깊이 비 a/d 가 1.5이며, 체적비 V_f 가 1.1%인 카고메 트러스로 복부 보강한 보 KRB2C와 전단철근비가 1.0%인 수직스티럽으로 보강한 보 SRB2C로 구성되어 있다. 이 C-계열 실험체의 하중-처짐 곡선과 균열 형상을 그림 10과 그림 11에 각각 나타냈다. 이 C-계열 보 역시 전단균열 하중에 도달하기 전까지는 앞에서 기술한 A-계열 보와 동일하게 거의 선형 탄성 거동이었다. 균열 발생 후에는 전단균열이 천천히 발달하면서 비선형성이 나타났다. 큰 특징은 전단균열 발생 후의 거동이 앞에서 기술한 B-계열의 거동 양태가 C-계열에서도 현저하게 나타난다는 것이다.

그림 10에 보인 C-계열 두 보의 하중-처짐 곡선을 비교해 보면, 전단균열 발생 후에 현저한 경화 거동을 보이는데, 카고메 트러스 보강 보에서 더욱 현저하여 결국 최대 저항강

도가 약 15% 더 증가하였다. 이것은 그림 8에 보인 것과 같이 B-계열 보에 나타난 것과 동일한 현상이며 C-계열에서 더욱 명확하게 나타나고 있다. 이 현상은 카고메 트러스의 등방성에 기인한 휨인장과 압축 철근량이 증가되는 효과에 따른 것으로 판단할 수 있다. 즉, 수직스티럽은 부재의 횡방향으로만 배치되어 휨에 대한 영향을 끼치지 않는다. 그러나 카고메 트러스는 횡방향 뿐만 아니라 종방향까지 보강 효과를 발휘할 수 있기 때문에 휨강도 증진 효과가 존재하여, 보강량이 클 경우에는 그 효과가 더 크게 나타날 것이다.

작용하중이 증가함에 따라 카고메 트러스 보강 보에서는 최대강도에 도달한 후 카고메 트러스를 구성하는 철선이 파단을 시작하였으며, 이후 하중 저항 능력이 파단 철선량에 해당하는 만큼의 강도가 감소한 상태로 카고메 트러스가 계속적으로 기능을 발휘하면서 연성을 유지하였다. 중국에는 위험 전단균열이 휨압축 영역까지 발달하여 전단-압축 파괴 형태로 극한상태에 도달하였으며, 이러한 현상은 스티럽 보강 보에서도 동일하였다.

4.2 카고메 트러스의 복부 보강 효과 고찰

콘크리트 부재의 복부 전단 보강 철근으로 카고메 트러스를 사용한 보를 실험하여 일반 스티럽으로 보강한 보의 실험결과와 비교한 결과 몇 가지 큰 차이를 발견할 수 있었다. 이 차이점을 역학적으로 분석하기 위해 그림 2(c)에 보인 카고메 트러스 단위셀에 작용할 수 있는 연직력 P 와 수평력 Q 를 계산하기 위해 단위셀의 절반인 사면체를 그림 12에 도해하였다.

그림 10. C-계열 보의 하중-처짐 곡선

그림 12. 연직력과 수평력을 받는 와이어 직조 카고메 트러스

요소 철선 하나의 단면적이 $A_w (= \pi d_w^2 / 4)$ 이고, 항복응력을 f_y 라고 한다면 요소 철선의 저항력 F 는 철선의 항복력 $A_w f_y$ 이 된다. 따라서 그림 12에 나타난 사면 요소가 담당할 수 있는 연직력과 수평력은 각각 다음과 같다.

$$P = \sqrt{6}F = \sqrt{6}A_w f_y \quad (2)$$

$$Q = \frac{4}{\sqrt{3}}F = \frac{4}{\sqrt{3}}A_w f_y \quad (3)$$

식 (1)과 같이 정의한 체적비 V_f 를 그림 2(c)에 나타난 단위셀의 깊이 h_c 와 철선의 단면적 A_w 로 환산 표시하면 다음과 같다.

$$V_f = \frac{4\sqrt{2}}{h_c^2} A_w \quad (4)$$

이 식을 A_w 에 대해 정리한 후 식 (2)에 대입하면 수직력이 체적비 V_f 의 항으로 표현된다. 그리고 이 연직력과 수직 스테럽 보강 보의 연직력을 등치하고, 단위셀의 단면적 h_c^2 으로 나누면 등가의 수직 스테럽 비 $\rho_{v,eq}$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\rho_{v,eq} = \frac{\sqrt{3}}{4} V_f \quad (5)$$

이 식은 카고메 트러스로 보강할 때 트러스 강재의 약 43%가 연직력에 저항하여 전단 보강근의 역할을 한다는 의미이다. 카고메 트러스와 동일한 질량을 갖는 복부 보강 수직 스테럽과 비교한다면, 폐합스테럽 형태이고 단면의 폭과 깊이의 비가 1에 가깝고 같고리까지 고려한다면 연직으로 배치된 강재량은 사용 총 강재 질량의 50-60% 정도가 연직력 발휘에 기여한다고 간주할 수 있다. 이처럼 복부 보강재의 총질량에서 연직력을 담당하는 강재 질량 비 관점으로 살펴본다면, 카고메 트러스는 수직스테럽과 비교하여 전단 기여 효율이 약간 낮은 복부 보강재라고 할 수 있다.

그런데 카고메 트러스는 식 (3)으로 표현된 종방향 수평 저항 성능을 동시에 갖고 있으므로 휨인장 및 압축 보강재의 역할을 한다. 수직스테럽은 부재 횡방향으로만 배치되어 휨에 대한 영향을 주지 않는 것과는 크게 다르다. 이 수평 저항 성능은 휨인장 철근이 추가되는 효과가 있으며, 또한 압축영역에서는 압축력의 일부를 저항함과 동시에 압축 콘크리트를 구속하여 유효압축강도를 증가시키는 효과를 갖고 있어서 휨강도가 증가된다. 이러한 이유 때문에 카고메 트러스로 복부를 보강한 보에서 전단균열 하중과 파괴 강도가 동시에 크게 나타나고 있다.

더욱이, 카고메 트러스는 그림 2에 보인 것과 같이 작은 크기의 단위셀로 구성된 우수한 균질 등방성을 갖고 있으며, 각 절점에서 정착 효과가 있는 구조이다. 이 연구에서 사용한 카고메 트러스의 단위셀 깊이 h_c 는 35 mm였다. 이 때문에 카고메 트러스로 보강된 보의 복부에는 단위셀의 간격으로 많은 수의 균열이 발생하였다. 이러한 현상은 응력과 변형률 재분배 효과라고 할 수 있다. 더욱 큰 특징은 카고메 트러스 보강 보의 전단균열 하중이 스테럽 보강 보에서 보다 더 크다는 점이다. 이것은 복부에서 경사 균열 발생 이전부터 응력 재분배 기능이 발휘되었기 때문으로 판단된다. 이 연구에서 보강제로 사용한 소축척 모형의 카고메 트러스는 단위셀이 깊이 방향으로 3개였다(그림 3(b) 참조).

만약 깊이가 큰 실제 보였다면 깊이 방향으로 단위셀 수가 더 많아질 것이며, 그에 따른 경사 균열의 수가 증가하게 되어 복부의 응력 재분배 효과가 더욱 현저해 질 것이다.

반면에, 작은 크기의 단위셀과 절점의 정착 효과에 의해 보강재의 인장 길이가 짧아서 균열을 가로 지르는 철선의 변형 능력이 작아지는 단점이 있다. 이러한 이유로 카고메 트러스로 보강된 보에서 최대강도에 도달한 후 복부 보강재가 빠르게 파단을 시작하였으며 그 후에는 하중 저항 능력이 파단 강재량에 해당하는 만큼의 강도가 감소한 상태로 나머지 보강재가 기능을 발휘하면서 연성을 유지하였다. 그리고, 중국에는 위험 전단균열이 휨압축 영역까지 발달하여 전단-압축파괴 형태로 극한상태에 도달하였다.

5. 결 론

기계 분야에서 많이 사용되는 규칙적 다공질 금속으로 제작된 카고메 트러스를 콘크리트 부재의 복부 전단보강재로 사용하여 소축척 모형 보를 제작하고 실험을 실시한 결과, 다음과 같은 현상을 확인할 수 있었다.

1. 카고메 트러스는 작은 크기의 단위셀로 구성된 우수한 균질 등방성을 갖고 있으며, 각 절점에서 정착 효과가 있는 구조로써, 균열간격은 단위셀의 깊이에 영향을 받는 것으로 나타났으며, 응력과 변형률 재분배 효과가 있었다. 이로 인해 카고메 트러스 보강 보의 전단균열 하중이 스테럽 보강 보에 비하여 더 크게 나타났다.
2. 카고메 트러스는 복부 보강재 기능과 동시에 휨 보강재의 역할을 한다. 복부에 카고메 트러스를 배치하면 휨인장 철근이 추가되는 효과가 있으며, 또한 압축영역에서는 압축력의 일부를 저항함과 동시에 압축 콘크리트를 구속하여 유효압축강도를 증가시키는 효과를 갖고 있어서 휨강도 또한 증가된다. 이 때문에 카고메 트러스로 복부를 보강하여 전단파괴를 방지한 보에서 파괴 강도가 크게 나타났다.
3. 카고메 트러스로 복부 보강한 보는 스테럽 보강 보와 동일한 연성 거동이 나타나고 있음을 확인하였다.
4. 반면에, 작은 크기의 단위셀과 절점의 정착 효과에 의해 보강재의 인장 길이가 짧아서 균열을 가로 지르는 철선 변형 능력이 작아지는 단점이 있다. 이러한 이유로 카고메 트러스로 보강된 보에서 최대강도에 도달한 후 복부 보강재가 빠르게 파단되었다.

참고문헌

- 김관수, 강기주(2010) 초경량 금속 구조재 직조장치의 설계 및 제작. **대한기계학회 논문집 A권**, 대한기계학회, 제34권 제9호, pp. 1235-1240.
- 양인환, 조창빈(2010) 강섬유 보강 초고강도 콘크리트 보의 휨강도 예측 기법의 제안. **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제30권 제3호, pp. 317-328.
- 원종필, 박찬기, 김윤정, 박경훈(2007) 고강도 시멘트 복합재료에서 단일 강섬유 및 합성섬유의 부착특성 평가. **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제27권 제A호, pp. 609-616.
- 이용현, 최지은, 전인수, 강기주(2007) 연속된 와이어를 이용한 다층 PCM의 제조 방법 및 특성 평가. **대한기계학회 논문집 A권**, 대한기계학회, 제31권 제2호, pp. 245-252.

이용현, 강기주(2008) 와이어 직조 카고메 다공질 금속을 심재로
갖는 샌드위치 판재의 최적 설계. **대한기계학회 논문집 A권**,
대한기계학회, 제32권 제9호, pp. 782-878.
ACI Committee 318 (2008) *Building Code Requirements for Struc-
tural Concrete (ACI 318-08) and Commentary*, American Con-

crete Institute, Farmington Hills, MI, 430pp.

Fib (2010), *fib Model Code 2010, First complete draft - Volume 1*,
Fédération internationale du béton, Switzerland, pp. 220-231.

(접수일: 2011.11.29/심사일: 2012.1.11/심사완료일: 2012.4.28)