강섬유콘크리트의 동적거동

Dynamic Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete

강 보 순*, 심 형 섭*

Kang Bo Soon Shim Hyung Seop

ABSTRACT

In this paper, dynamic behavior of steel fiber reinforced concrete(SFRC) by experimental method is discussed. Because of its improved ability to dissipate energy, impact resistance and fatigue behavior, SFRC has a better dynamic behavior than that of plain concrete. Dynamic behavior is influenced by longitudinal reinforcement ratio, volume and type of steel fiber, strength of concrete and the stress level. Impact resistance and damping in the SFRC has been evaluated from dynamic experimental test data at various levels of cracked states in the elements

1. 서론

일반적으로 철근콘크리트는 압축강도에 비하여 인장강도는 상대적으로 매우 작으므로 인장강도의 증진과 균열제한을 위한 많은 연구가 수행되고 있다. 철근콘크리트의 특성에 관한 연구중 정하중하에 있는 단기거동에 관해서는 비교적 많은 연구논문이 발표되어 있고 일부 동적 하중에 대한 강섬유철근콘크리트의 강도증진 및 Ductility 향상에 관한 효과을 규명한 연구실적이나 피로하중에 대한 한 연구는 아직도 미비한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 동하중을 받는 구조물에 강섬유콘크리트를 적용할 수 있도록 강섬유콘크리트의 충격특성 및 피로거동등을 실험적 연구결과로 보여준다.

강섬유콘크리트는 특히 숏크리트와 산업슬래브포장과 같은 적용 분야에서는 벌써 주목할 정도로 성공적인 반면에 일반적인 건설실무에서는 적용가능성이 주로 경제적인 이유로 해서 지금 까지는 부분적으로 제한되었다. 그러나 특수한 분야 예를 들면 충격하중, 지진하중 및 피로하중등과 같은 동적하중이 작용하는 구조물에 대해서는 흥미로운 가능성을 열어 놓고 있다.

기존 철근콘크리트는 잘 알려진 단점인 비동질성과 비등방성을 갖고 있으나 강섬유콘크리트는 이에 비해 기본적으로 장점인 조건들을 갖고 있다. 균등한 섬유분포가 가능할 때(공간적인 모든 방향에서 섬유위치에 관하여서도 균등한) 적어도 확실한 한계 내에, 모든 3차원 방향에서 같은 특성을 갖는 하나의 거시적인 유사동질재료이다(유사등방 연속체). 그림1은 이상적인 무질서의 기본으로 섬유의 분포된 위치의 표현을 보여 주고 있다. 그림1에 아주 짧은 것으로부터 점 형태까지로 나타나는 섬유는

* 정회원, 경주대학교 건설환경시스템공학부 조교수

그림표면에서 직각으로 놓여 있는 섬유이고 사이에 큰 공백들은 큰 골재들이다. 이와 같이 곳곳아 모든 방향에 의해 계속 고루 분포된 강섬유콘크리트 효과는 3축방향과, 더 질김으로 제작된 재료특성 즉 강섬유콘크리트를 특히 충격하중과 다른 동적하중하에 있는 구조물에 추천할 수있다. 계속 되는 선호의 예상으로 높은 마모강도 와 열전도율 그리고 작은 건조수축을 강섬유콘크리트가 갖고 있지만 여기서는 다루지 않게 된다. 끝으로 내구성은 구조물표면에서 다소 불충분한 강섬유콘크리트 덮개로 인해 문제가 되지 않는 것을 알 수 있다. 부식되는 주변조건들이 올 때 직접적인 표면근처에서 부식물이 발생되지만 그 양은 아주 작은 부피에불과하다. 부식모양은 자유로운 점 형태의 파편으로 깊이는 약 2mm 까지 들어 갈 수 있다. 계속되는 결과로 새기는 파편힘이 내구성에 영향을 미치지 못한다. 이것은 모든 경우에 지저분한 얼룩과 연결된 미관문제이다. 시멘트가 사용된 구조물 표면층에 의해 발생되나 이러한 눈에 나타나는 문제는 원하면 장기적이고 효과적으로 대처 할 수 있다.

그림 1 강섬유콘크리트의 x-선 사진

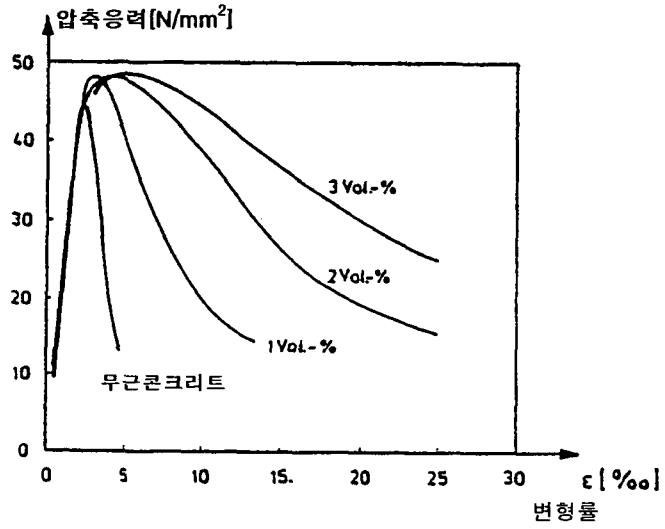

그림 2 강섬유콘크리트의 압축응력-변형률 곡선

2.동적거동을 위한 기본특성

2.1 강도

콘크리트 인장강도 및 압축강도, 즉 응력-변형률 곡선에서 만난 최대 응력치은 강섬유혼입으로 인해 그렇게 증가되지는 않는다(그림 2,3,4). 이와 같은 특성은 여러축 강도에서도 유사하다. 그러나 큰 변형범위를 초과한 강도특성은 강섬유에 의해 확실하게된다. 강섬유는 인장강도 또는 압축강도에 도달한 후 또는 이 강도치에 부가된 변형치를 초과한 후 근본적으로 거동에 영향을 준다.

인장 영역을 위해서 효과적인 Post-Cracking 거동와 같이 인장에서 계획적으로 이용할 수 있는 재료저항을 위한 좀 더 높은 정도 신뢰성도 준다.

그림 2.3 과 4에 응력-변형률 곡선의 증가되는 정점의 완만한 기울기가 인식될 수 있는 탄성계수의 무시할 수 있는 감소는 강섬유를 함께 혼합하는 할 때 보통 콘크리트 다짐에 기인한다는 것에 알 수 있다. 이와는 반대로 더 큰 의미는 파괴변형에 강섬유의 영향으로 변형성에 대한 척도와 동적으로 기대하는 높은 에너지면적, 이것은 일반적으로 강섬유 혼입으로 증가된다.

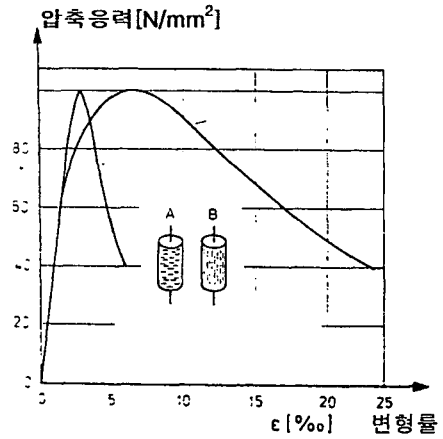

그림 3. SFC의 다축 압축응력-변형률곡선

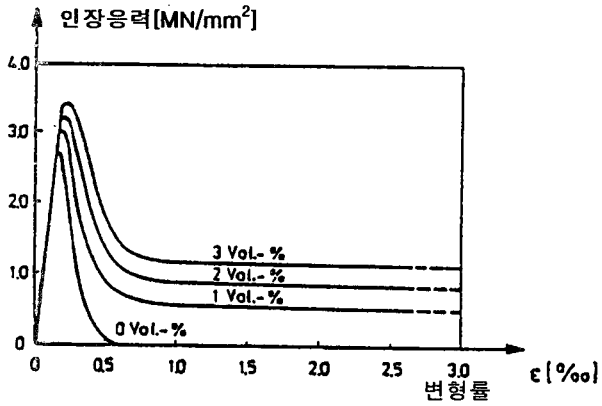

그림 4 강유콘크리트의 인장응력-변형률곡선

2.2. 파괴변형

2.2.1 인장변형

실험실 조건하에서 강섬유가 인장하중에 대한 균열을 발생시키는 초기 인장변형(인장강도에 해당되는 변형: 균열변형)에는 큰 영향을 주지 못한다. 이것은 실무적인 면에서 그렇게 크지 않다. 그래도 확인할 수 있는 균열변형의 큰 증가가 일어나면 그것은 외부적으로 볼 수 없으나 전체에서 알 수 있는 균열발생전에 커지는 작용과 등가 증가된 균열변형을 가져오는 여러개의 미세한 균열에 기인할 수 있다. 유사하게 만들어진 강섬유 표면과 싸고 있는 콘크리트의 부착효과이다.

인장저항까지 뚜렷한 정도로 변형성을 인장한계변형으로서 이해한다면 강섬유혼입으로 여러배의 증가된 값을 얻게된다. 여기서 비교적 길게 인장변위을 받게되는 부착효과와 요철효과에 기인한 강섬유 인발저항에 의한 인장상태를 다루게 된다.

2.2.2 압축변형

콘크리트의 압축파괴변형은 강섬유혼입으로 뚜렷하게 증가된다(그림5). 그러나 첫 조직손상시 거시적으로 볼 수 있을 경우 압축파괴변형을 다만 콘크리트수축으로만 이해하면 강섬유가 없는 콘크리트에 비해 크게 차이가 없다. 그 다음 첫 저항순간 강섬유의 영향은 발휘된다. 손상이 발생한 후 강섬유가 내부구조에서 함께 작용하여 계속 증가되는 압축변형 시 압축응력에 따른 작은 기울기를 갖고 있다.

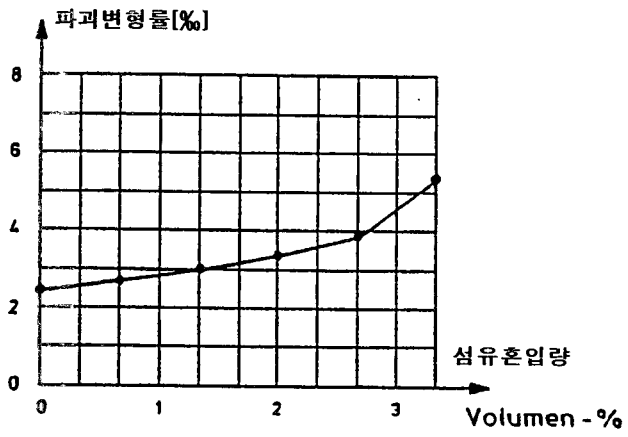

그림 5 강섬유콘크리트의 압축파괴변형

전체적으로 강섬유의 혼입으로 콘크리트 압축응력-변형률곡선에서 면적증가, 즉 에너지 능력의 현상을 나타내고 있다.

2.2.3 휨변형

일반적으로 순수한 인장이나 휨하중하에 있는 철근콘크리트 구조물의 균열발생은 인장부분의 가장 취약한 곳에서 콘크리트의 인장강도를 초과할 때 발생한다. 이곳의 콘크리트 단면의 응력은 없다고 가정하고 철근이 인장력을 받으므로 철근응력이 큰 폭으로 증가 하게된다. 그러나 강섬유철근콘크리트에서는 균열단면에서 우회하는 응력의 일부분을 강섬유가 부담 하게되어 균열단면의 콘크리트의 응력이 없어지는 것이 아니라 일정량의 강섬유응력이 콘크리트의 응력을 대신하여 계속 유지하게 된다(그림 5). 따라서 균열단면의 철근응력은 상대적으로 작아져 그에 상응하는 철근과 콘크리트의 유효부착길이도 작아지므로 균열폭이 작아지게 된다. 그리고 또한 강섬유철근콘크리트의 중립축의 위치가 콘크리트 압축방향으로 작게 이동하게 되어 같은하중하에서 강섬유철근콘크리트의 균열깊이가 강섬유가 없는 보통철근콘크리트 보다 작아져서 결과적으로는 강성을 증가시키고 처짐을 감소시킨다. 이러한 균열특성의 결정적인 변화는 강섬유를 보강함으로써 철근콘크리트 구조물의 변위 내지는 사용성 상태에 큰 영향을 줄 수가 있다. 강섬유철근콘크리트에서는 균열단면에서 응력의 일부분을 강섬유가 부담 하게되는 것을 고려하여 감소된 철근응력이 결정된다.

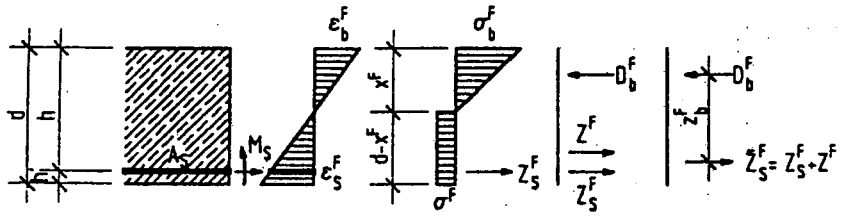

그림 6 휨부재의 균열단면에서 작용하는 강섬유철근콘크리트의 변형, 응력 및 힘

2.2.4 충격강도

보강하지 않은 일반 콘크리트와 강섬유 콘크리트의 충격강도를 위한 실험은 강섬유 혼입으로 충격하중에 대한 저항상승을 가져온다. 실린더 시편에 일정한 높이의 낙하실험을 통해 파괴까지 지지할 수 있는 횟수를 취하면 충격강도을 위한 척도로서 그림7과 같은 결과를 얻게된다. 강섬유의 혼입으로 정의된 충격강도가 20배가 넘는다. 이와 같은 충격하중의 저항력은 확실한 강섬유콘크리트로 효과로 충격하중에 대한 긍정적인 다축 변형특성과 확실히 향상된 강섬유콘크리트의 에너지능력에 기인한다. 충격하중에 대한 이와 같은 특성은 특히 섬유로 강하게 생기는 내부 마찰 내지는 이런 유형의 하중 재하 시 에너지 감쇄로

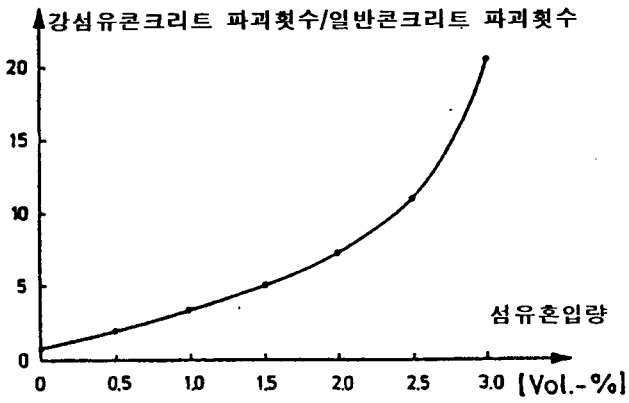

그림7 혼입량에에 따른 강섬유콘크리트의 충격강도

설명될 수 있어 동하중이 작용하는 콘크리트 구조물에 강섬유를 혼입할 경우 동적거동에 효과적인 영향을 미친다.

3. 에너지 감쇄

일반적으로 비균열상태에서 종방향으로 모든 단면에서 에너지감쇄기능이 동일하다. 그러나 균열상태에서 철근콘크리트구조물의 에너지감쇄는 주로 균열된 부분에서 발생된다. 즉, 균열부에서의 철근과 콘크리트사이의 상대적인 변위에 의해 진동에너지가 열로 변화됨으로 마찰 에너지감쇄가 생긴다. 이와 같이, 구해진 에너지감쇄치들은 구조물에 좌우되기 때문에 "구조물의 에너지감쇄"라고도 말한다.

각 처짐단계의 진동에서 에너지 감쇄의 진행이 쌍곡선모양으로 나타나며, 마찰에너지감쇄로 인하여 발생하는 등가에너지감쇄치가 처짐이 증가되면 감소되고 반대로 처짐이 감소하면 에너지감쇄치는 증가한다. 곡선상의 점들은 최대 처짐과 측정 순간의 처짐에 의하여 결정된다.

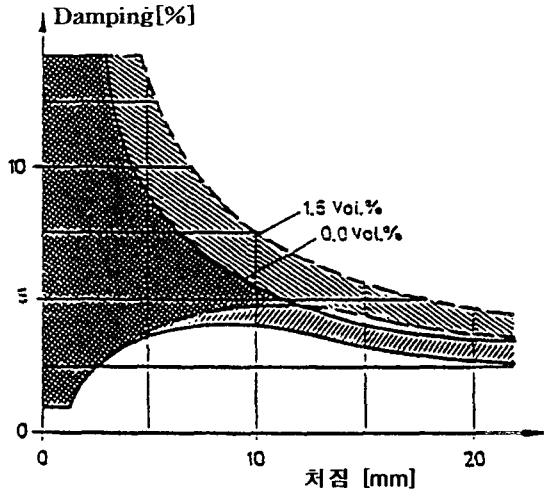

그림 8 처짐에 따른 강섬유철근콘크리트의 에너지 감쇄치

그림8은 저자 연구소의 실험결과로 다섯 개의 상이한 초기처짐에서 에너지감쇄와 처짐의 관계를 나타낸다. 이 곡선들로부터 처짐에 대한 에너지감쇄치의 관계를 알 수 있으며 또한 에너지감쇄치의 상한과 하한이 결정되고, 최대 처짐과 측정 순간의 처짐에 의해 결정되는 각 에너지감쇄치들은 그 사이에 존재하게 된다.

강섬유로 보강된 시험체경우(혼입량: V_f=1.6 Vol.%)와 보강되지 않은 시험체경우(혼입량: V_f=0.0 Vol.%)에 대한 철근비 μ=0.44%에서의 결과가 그림6에 나타나 있다. 강섬유로 보강된 시험체경우에 약 15%정도의 더 큰 에너지감쇄치를 보인다.

4. 충격실험

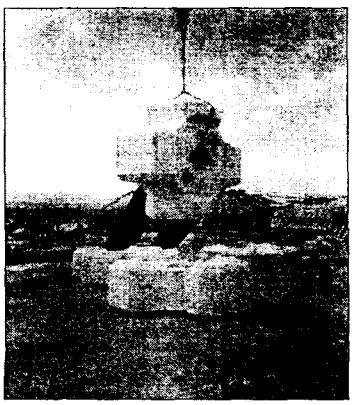

그림 9 충격실험 Test-up

각 Block(무근콘크리트, 강섬유 30kg/m^{3}와 60kg/m^3, 0.5%인장 및 압축배근)마다 4ton 콘크리트블록갖고 낙하높이를 증가시켜 파괴까지 실험을 수행하여 다음과같은 결과를 얻었다.

무근 콘크리트 0.5m의 낙하고에서 각 방향별로 균열폭이 0.1~10.0mm까지 발생되었고 발생된 균열은 모두 관통균열형태로 완파가 되었다. 강섬유 30kg/m^{3}시편은 한쪽 방향에 1mm의 관통균열이 발생하여 파손이 되었다. 강섬유 60kg/m^{3}은 0.5m에서 1.5m까지 낙하시험을 한결과 0.5m까지는 손상이 없었고 0.8m에서 한쪽 방향에 0.2~1.0mm의 관통균열이 발생하였다. 철근콘크리트는 낙하고 0.8m까지는 손상이 없었지만 1.0m에서 균열이 부부분적으로 발생하였다. 낙하고 1.5m에서 시험을 한 결과 1m에서 발

생한 균열이 조금 더 커지는 정도이었다.

이와 같은 충격실험 결과로 볼 때 실제 시공현장에서 사용가능한 항만에 사용되는 콘크리트피복 Block으로는 60kg/m^{3}의 강섬유가 포함된 콘크리트 Block과 철근콘크리트 Block이 적정하지만 제작공정과 경제성 측면을 고려할 때 60kg/m^{3}의 강섬유가 포함된 콘크리트 Block을 사용하는 것이 바람직하다고 사료된다. 현장에서 실제로 테트라포트를 적재할 때 최대한 충격을 줄이며 적재를 하는 것을 볼 때 이 실험에서 낙하고 1.5m는 실제 현장조건보다 더 극한상태까지 고려한 시험이라고 볼 수 있다.

5. 피로성능

본 피로실험에서는 슬래브궤도시스템의 최적화를 위해 3백만번의 사용반복휨하중을 슬래브에 재하시켰다. 기존 철근콘크리트 슬래브와 추가적으로 강섬유 Dramix 50/0.6를 40kg/m^3 (0.5 Vol, %)혼입한 강섬유철근콘크리트 슬래브가 연구되었다.

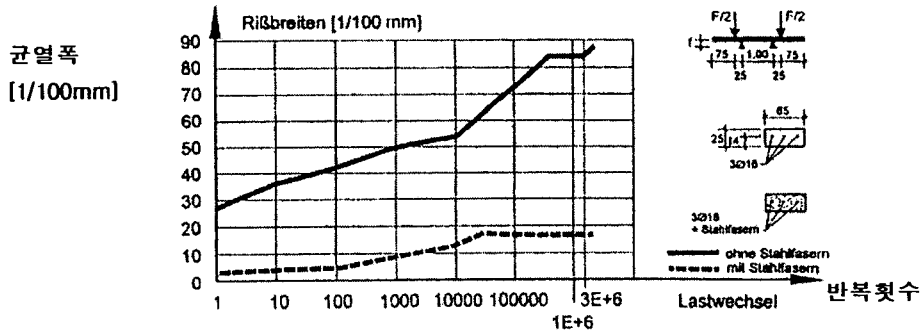

그림10 강섬유콘크리트의 반복횟수에 대한 균열폭 진전

연구결과는 그림10에 나타나 있다. 그림10은 철근콘크리트 최대균열폭은 사용반복휨하중하에서 크게 증가되고 3백만의 반복하중후에는 0.9mm을 나타내는 반면에 강섬유철근콘크리트 슬래브의 균열폭은 0.2mm에 불과해 높은요구를 만족시켜준다.

6. 결론

1) 강섬유의 혼입으로 충격강도가 20배가 넘는 충격하중의 저항력은 확실한 효과을 가져다 준다.
2) 강섬유로 보강된 시험체경우에 약 15%정도의 더 큰 에너지감쇄치를 보인다.
3) 충격실험 결과는 60kg/m^{3}의 강섬유콘크리트 Block와 철근콘크리트 Block가 거의 같은 효과를 가져오나 제작공정과 경제성 측면을 고려할 때 철근콘크리트Block보다 항만분야에 더 적절하다.,
4) 사용반복휨하중하에서 철근콘크리트 슬래브 최대균열폭은 3백만의 반복하중후에는 0.9mm인 반면에 강섬유철근콘크리트 슬래브의 균열폭은 0.2mm에 불과하다.

참고문헌

1. Stangenberg, F. : Stahlfaserbeton als hervorragender Baustoff für stossbeanspruchte Bauteile. Bauingenieur Nr.61, 1986, 339-345.
2. Kang, B.S. : Stahlfaserbeton und stahlfaserverstärkter Stahlbeton unter Schwellbeanspruchung. Dissertataion, Ruhr-Universität Bochum, 1998.