[UCI]I804:24011-200000235938

２００８年２月

工學碩士學位論文

강섬유 보강 순환골재 콘크리트의 구조적 특성에 관한 연구

朝鮮大學校 産業大學院

建築工學科

金 勝 鎬

강섬유 보강 순환골재 콘크리트의 구조적 특성에 관한 연구

A Study on the Structural Characteristic of Recycled Aggregate Concrete Reinforced Steel Fiber

2008年　2月　　日

朝 鮮 大 學 校　産 業 大 學 院

建 築 工 學 科

金　　勝　　鎬

강섬유 보강 순환골재 콘크리트의 구조적 특성에 관한 연구

指導敎授　金　政　燮

이 論文을 工學碩士學位 論文으로 申請함.

2007年 10月　日

朝 鮮 大 學 校　産 業 大 學 院

建 築 工 學 科

金　勝　鎬

金勝鎬의 工學碩士學位論文을 認准함

委 員 長　　朝鮮大學校　　敎授　　梁 永 晟　印

委　　員　　朝鮮大學校　　敎授　　金 義 植　印

委　　員　　朝鮮大學校　　敎授　　金 政 燮　印

2007年 11月　日

朝 鮮 大 學 校　産 業 大 學 院

목 차

Abstract

기 호

Ⅰ. 서 론 ····· 1

1.1 연구배경 및 목적 ····· 1
1.2 연구의 범위 및 방향 ····· 2
1.3 기존 연구의 동향 ····· 3
1.3.1 굳지 않은 순환골재 콘크리트의 특성 ····· 3
1.3.2 경화(硬化)된 순환골재 콘크리트의 특성 ····· 6
1.3.3 강섬유 보강 콘크리트의 특성 ····· 10
1.4 연구 진행 흐름도 ····· 13

Ⅱ. 이론적 연구 ····· 14

2.1 폐기물 발생현황 ····· 14
2.2 건설폐기물 처리 및 재활용 현황 ····· 17
2.3 콘크리트용 순환골재의 특성 ····· 18
2.4 강섬유 보강 콘크리트의 개요 ····· 22
2.4.1 섬유 종류와 특성 ····· 22
2.4.2 강섬유 분포 특성 ····· 23
2.4.3 강섬유 배열 특성 ····· 24
2.4.4 강섬유 형상비와 혼입률 특성 ····· 24
2.5 강섬유 보강 콘크리트 기본이론 ····· 24
2.5.1 강섬유 간격 이론 ····· 25
2.5.2 강섬유 복합체 이론 ····· 27
2.6 강섬유 보강 콘크리트의 역학적 특성 ····· 28
2.6.1 압축강도 ····· 28
2.6.2 인장강도 ····· 29
2.6.3 휨강도 ····· 30
2.6.4 전단강도 ····· 31
2.6.5 탄성계수 ····· 35

Ⅲ. 실험계획 ····· 36
3.1 실험개요 ····· 36
3.2 실험 기기 ····· 37
3.3 실험 변수 ····· 38
3.4 사용 재료 ····· 39
3.4.1 시멘트 ····· 39
3.4.2 골재 ····· 39
3.4.3 순환골재 ····· 39
3.4.4 강섬유 ····· 40
3.4.5 철근 ····· 41
3.4.6 AE 감수제 ····· 41
3.5 콘크리트의 배합 ····· 42
3.6 실험 방법 ····· 43
3.6.1 콘크리트의 압축강도 실험 ····· 43
3.6.2 콘크리트의 인장강도 실험 ····· 43
3.6.3 콘크리트 내화도(耐火度) 실험 ····· 44
3.6.4 휨 실험 ····· 45

Ⅳ. 재료 실험결과 ····· 47
4.1 콘크리트 압축강도 실험결과 ····· 47
4.2 콘크리트 쪼갬 인장강도 실험결과 ····· 56
4.3 콘크리트의 내화도 실험결과 ····· 61
4.4 초음파속도 실험결과 ····· 68

Ⅴ. 철근콘크리트 보의 휨 실험결과 ····· 71
5.1 실험 결과 ····· 71
5.2 균열 및 파괴 양상 ····· 78
5.2.1 강섬유 무보강 순환골재 시험체의 균열 및 파괴 양상 ····· 78
5.2.2 강섬유 보강 순환골재 시험체의 균열 및 파괴 양상 ····· 81
5.3 연성(延性) 능력 ····· 86

Ⅵ. 결론 ····· 89

참고문헌 ····· 91

부 록 ····· 95

표 목 차

<표 2.1> 2000~2004년 건설폐기물 성상현황 ····· 16
<표 2.2> 2005년 건설폐기물 성상현황 ····· 16
<표 2.3> 건설폐기물의 처리방법 변화 추이 ····· 17
<표 2.4> 순환골재에 혼입된 불순물 ····· 19
<표 2.5> 미분(微粉)의 화학적 분석결과 ····· 20
<표 2.6> 보통 콘크리트에 비해 15%의 압축강도를 감소시킨 혼합물의 체적율 ····· 21
<표 2.7> 유해 혼합물의 최대량 ····· 21

<표 3.1> 실험계획 및 변수 ····· 38
<표 3.2> 시멘트의 화학적 성분 및 물리적 성질 ····· 39
<표 3.3> 골재의 물리적 성질 ····· 39
<표 3.4> 폐콘크리트의 물리적 성질 ····· 40
<표 3.5> 강섬유의 물리적 성질 ····· 40
<표 3.6> 철근의 재료특성 ····· 41
<표 3.7> AE 감수제의 물리적 특성 ····· 41
<표 3.8> 콘크리트 배합표 ····· 42

<표 4.1> 강섬유 무 보강한 순환골재콘크리트의 재령에 따른 압축강도 ····· 47
<표 4.2> 순환골재를 사용한 콘크리트의 재령에 따른 압축강도 발현율 ····· 48
<표 4.3> 강섬유보강 순환골재 콘크리트의 재령에 따른 압축강도 ····· 50
<표 4.4> 강섬유 보강 순환골재 콘크리트의 재령에 따른 압축강도 발현율 ····· 51
<표 4.5> 순환골재를 사용한 콘크리트의 재령에 따른 쪼갬 인장강도 ····· 56
<표 4.6> 순환골재 혼입한 콘크리트의 재령에 따른 쪼갬 인장강도 발현율 ····· 57
<표 4.7> 강섬유 보강 순환골재 콘크리트의 재령에 따른 쪼갬 인장강도 ····· 58

<표 4.8> 강섬유보강 순환골재 콘크리트의 재령에 따른 쪼갬 인장강도 발현율 ····· 59
<표 4.9> 순환골재를 혼입한 콘크리트의 내화도 실험 후 압축강도 실험 결과 ····· 61
<표 4.10> 강섬유 보강 순환골재 콘크리트의 내화도 실험 후 압축강도 실험 결과 ···· 64
<표 4.11> 강섬유 무보강 순환골재 콘크리트의 재령별 초음파속도 ····· 68
<표 4.12> 강섬유 보강 순환골재 콘크리트의 재령별 초음파속도 ····· 69

<표 5.1> 강섬유 무보강 순환골재 시험체의 휨 실험결과 ····· 71
<표 5.2> 강섬유 보강 순환골재 시험체의 휨 실험결과 ····· 74
<표 5.3> 강섬유 무보강 순환골재 시험체별 연성계수 ····· 87
<표 5.4> 강섬유 보강 순환골재 시험체별 연성계수 ····· 88

그 림 목 차

[그림 1.1] 연구 진행 흐름도 ····· 13

[그림 2.1] 폐기물 종류별 구성비율 ····· 14
[그림 2.2] 건설폐기물 발생량 ····· 15
[그림 2.3] 이론적인 인장강도 ····· 25
[그림 2.4] 강섬유간격에 따른 인장강도의 변화 ····· 26
[그림 2.5] 압축강도와 강섬유 혼입률의 관계 ····· 29
[그림 2.6] 강섬유 보강 콘크리트의 인장응력-변형률 곡선 ····· 30
[그림 2.7] 강섬유 보강 콘크리트의 응력-변형 곡선 ····· 31
[그림 2.8] 강섬유 보강 콘크리트보의 균열후 내력 ····· 32

[그림 3.1] 휨 시험체의 배근 상세도 ····· 36
[그림 3.2] 휨 시험체의 Set-up ····· 45
[그림 3.3] 휨 시험체의 스트레인 게이지 부착위치 ····· 46

[그림 4.1] 강섬유 무 보강한 순환골재콘크리트의 재령에 따른 압축강도 ····· 47
[그림 4.2] 순환골재를 사용한 콘크리트의 재령에 따른 압축강도 발현율 ····· 49
[그림 4.3] 강섬유 보강 순환골재 콘크리트의 재령에 따른 압축강도 ····· 50
[그림 4.4] 강섬유보강 순환골재 콘크리트의 재령에 따른 압축강도 발현율 ····· 52
[그림 4.5] 강섬유 보강 유무에 따른 순환골재 콘크리트의 재령별 압축강도 ····· 53
[그림 4.6] 강섬유 무보강 순환골재 콘크리트의 재령에 따른 쪼갬 인장강도 ····· 56
[그림 4.7] 강섬유 무보강 순환골재 콘크리트의 재령에 따른 인장강도 발현율 ····· 57
[그림 4.8] 강섬유 보강 순환골재 콘크리트의 재령에 따른 쪼갬 인장강도 ····· 58
[그림 4.9] 강섬유 보강 순환골재 콘크리트의 재령에 따른 쪼갬 인장강도 발현율 ····· 59
[그림 4.10] 강섬유 보강 유무에 따른 순환골재 콘크리트의 재령에 따른 인장강도 ····· 60
[그림 4.11] 강섬유 무보강 순환골재 콘크리트의 내화도 실험 후 압축강도 ····· 61
[그림 4.12] 순환골재를 혼입한 콘크리트의 내화도 실험 후 압축강도 감소율 ····· 62
[그림 4.13] 강섬유보강 순환골재 콘크리트의 내화도 실험 후 압축강도 결과 ····· 65
[그림 4.14] 강섬유보강 순환골재 콘크리트의 내화도 실험 후 압축강도 감소율 ····· 66
[그림 4.15] 강섬유 보강 유무에 따른 순환골재 콘크리트의 내화도 실험 후 압축강도 ····· 67

[그림 4.16] 강섬유 보강 유무에 따른 순환골재 콘크리트의 내화도 실험 후 압축강도 감소율 ·· 67
[그림 4.17] 강섬유 무보강 순환골재 콘크리트의 재령별 초음파속도 ····· 68
[그림 4.18] 강섬유 보강 순환골재를 콘크리트의 재령별 초음파속도 ····· 69
[그림 4.19] 강섬유 보강 유무에 따른 순환골재를 콘크리트의 재령별 초음파속도 ····· 70

[그림 5.1] 강섬유 무보강 순환골재 시험체의 휨 실험결과 ····· 72
[그림 5.2] WC0-N 시험체의 응력-처짐 곡선 ····· 72
[그림 5.3] WC30-N 시험체의 응력-처짐 곡선 ····· 73
[그림 5.4] WC60-N 시험체의 응력-처짐 곡선 ····· 73
[그림 5.5] 강섬유 보강 순환골재 시험체의 휨 실험결과 ····· 75
[그림 5.6] 강섬유 보강 순환골재 시험체의 응력-처짐 곡선 ····· 75
[그림 5.7] 강섬유 보강 유무에 순환골재 시험체의 휨 실험결과 ····· 77
[그림 5.8] 강섬유 무보강 순환골재 휨 시험체의 균열도 ····· 80
[그림 5.9] 강섬유 보강 순환골재 휨 시험체의 균열도 ····· 83
[그림 5.10] 강섬유 보강 유무에 따른 순환골재 시험체의 연성계수 ····· 88

사 진 목 차

[사진 3.1] 순환골재 전경 ····· 40
[사진 3.2] 강섬유 전경 ····· 40
[사진 3.3] 콘크리트 압축강도 실험 전경 ····· 43
[사진 3.4] 콘크리트 인장강도 실험 전경 ····· 44
[사진 3.5] 콘크리트 내화도 실험 전경 ····· 45
[사진 3.6] 휨 시험체의 파괴 전·후 전경 ····· 46

[사진 4.1] 강섬유 무보강 순환골재 콘크리트의 전자현미경 촬영 ····· 54
[사진 4.2] 강섬유 보강 순환골재 콘크리트의 전자현미경 촬영 ····· 55
[사진 4.3] 내화도 실험 후 시험체 전경 ····· 63

[사진 5.1] 강섬유 보강 순환골재 휨 시험체의 파괴 후 전경 ····· 85

부 록 사 진 목 차

사진 1. 철근 배근 전경 ····· 95
사진 2. 시험체 철근게이지 부착 후 전경 ····· 95
사진 3. 거푸집 전경 ····· 96
사진 4. 슬럼프 테스트 ····· 96
사진 5. Ø100×200 원주형 공시체 제작 전경 ····· 97
사진 6. 재령 7일 압축강도 실험 전경 ····· 97
사진 7. 재령 28일 압축강도 실험 전경 ····· 98
사진 8. 부재 시험체 연마 전경 ····· 98
사진 9. WC30-N-2 시험체 파괴 후 전경 ····· 99
사진 10. WC30-N-3 시험체 파괴 후 전경 ····· 99
사진 11. WC60-N-2 시험체 파괴 후 전경 ····· 100
사진 12. WC60-N-3 시험체 파괴 후 전경 ····· 100
사진 13. WC0-S-2 시험체 파괴 후 전경 ····· 101
사진 14. WC0-S-3 시험체 파괴 후 전경 ····· 101
사진 15. WC30-S-2 시험체 파괴 후 전경 ····· 102
사진 16. WC30-S-3 시험체 파괴 후 전경 ····· 102
사진 17. WC60-S-2 시험체 파괴 후 전경 ····· 103
사진 18. WC60-S-3 시험체 파괴 후 전경 ····· 103

기 호

f_{ck} : 콘크리트 설계기준 압축강도(MPa)

f_t : 콘크리트의 쪼갬 인장강도(MPa)

V_p : 초음파속도(km/sec)

P_{cr} : 초기균열 발생하중(kN)

δ_{cr} : 초기균열 부재의 변위(mm)

P_y : 시험체의 항복하중(kN)

σ_y : 시험체의 항복강도(MPa)

δ_y : 시험체의 항복시 부재의 변위(mm)

P_u : 시험체의 극한 휨하중(kN)

σ_u : 시험체의 극한 휨강도(MPa)

δ_u : 극한하중시 부재의 변위(mm)

μ_u : 연성계수

ASTM : 미국 재료 시험 협회(American Society of Testing Materials)

ACI : 미국 콘크리트학회(American Concrete Institute)

SFRC : Steel Fiber Reinforced Concrete

Abstract

A Study on the Structural Characteristic of Recycled Aggregate Concrete Reinforced Steel Fiber

By Kim, Seung-ho

Director : Prof. Kim, Jeong-sup
Department of Architectural Engineering,
Graduate School of Industry,
Chosun University

The present research has the following conclusion from a manufacture of a test material based on a recyclable aggregate mixture(30%, 60%)-based steel fiber reinforcement for using the same as a bigger aggregate instead concrete and a material and structural characteristic which affects the Reinforced concrete.

1. As a result of a material-age based compressive strength, as the mixing amount of circular aggregate increases, a material-age based steel fiber non-reinforced test material is lower by 3.8～17.2%, and has a decrease of a steel fiber reinforced test material. As comparing the reinforcement of a steel fiber, the steel fiber-reinforced test material is lower by 8.4～9.3% as compared to the non-reinforced test material.

2. As a result of the material age-based tensile test, as the mixing amount of a recyclable aggregate increases, the material age-based steel fiber non-reinforced test material has a decrease of 5.0～18.4%, and the steel and

fiber reinforcing test material has a decrease of 0.4~21.8%.

As comparing based on the steel fiber reinforcements, the steel fiber reinforced test material is higher by 3.0~11.1% with respect to the non-reinforced test material.

When a steel fiber are reinforced to the recyclable aggregate concrete based on a result of the compressive strength and a result of the tensile strength, the compressive and tensile strengths are significantly enhanced.

3. As a result of the bending test, as the mixing amount of the recyclable aggregate increases, the yield and maximum strengths are slightly decreased, but almost similar movements are shown.

In addition, as the recyclable aggregate increases, the smoothness coefficient decreases. The test material mixed with 30% of the recyclable aggregate mixed with steel fiber has a flexibility enhancement of 14.5%, and the test material mixed with 60% of recyclable aggregate is 25.3%.

4. As a result of various material tests and member tests, the steel fiber are reinforced with waste concrete classified as impurities with respect to common ground stones. Even when 60% of the mixing rate is adapted, it has compressive, tensile strengths and bending resistances similar with the concrete which uses common ground stones. So, it is judged that it may be adapted to an actual structure of a concrete bar made of waste concrete.

It is needed to further perform a research on other reinforcing materials and searing for enhancing a flexibility coefficient.

Ⅰ. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

국내에서는 1990년대 이후 재건축 및 재개발, 리모델링(remodeling) 등으로 인한 건설폐기물의 발생량이 급증하고 있으며 이로 인한 대책 마련은 미비한 상태이다. 특히 건설 폐기물을 처리하는데 있어서 매립지의 용량은 한계 상태에 달했으나, 그와 반대로 건설폐기물의 처리는 주로 단순 매립에 의존하여 왔으며 막대한 수송비와 처분 비용 및 매립장의 부족으로 인해 현재 국내에서 발생되는 건설폐기물의 상당 부분이 불법으로 매립 처리하는 상황이다.

이러한 상황이 거듭 되면서, 건설폐기물의 불법처분·투기 및 소각처리로 인해 환경오염에도 큰 문제로 대두 되고 있는 실정이다.

또 다른 문제점은 신도시 건설, 재개발사업, 지역 개발 프로젝트 등으로 건설 골재의 사용이 증가되면서, 누적되어온 골재 부족현상이 심각한 상황에 도달한 것이다. 골재 수요량은 계속 증가하고 있으나, 환경파괴를 우려한 바다모래·하천(河川) 모래의 채취량 삭감, 기후조건의 악화에 따른 바다모래 채취량 감소 등으로 국내의 건설산업은 갈수록 극심한 골재난을 겪고 있으나 그에 대한 마땅한 해결책은 부족한 상황이다.

이러한 상황에서 순환골재의 필요성은 현저히 증가하고 있기에, 재활용 방안에 관한 연구가 시급히 필요하다.

특히 폐기물에서 상당부분을 차지하는 폐콘크리트를 순환골재로서 재활용하는 방법에 대한 연구를 추진할 필요가 있다.

또한 순환골재 콘크리트는 사용상 자연산 골재보다 여러 가지 물리적 성상 및 파괴시 취성적인 성질 등의 취약한 것이 문제점으로 나타나, 이점을 보완할 수 있는 방안이 필요하다.

이와같은 순환골재 사용으로 인한 문제점을 보완하기 위하여 혼화재료 및 섬유질재료를 사용하고자 한다.

이러한 섬유질 재료중의 하나인 강섬유(Steel Fiber)로 보강한 강섬유 보강 콘크리트는 불연속적이며 길이가 짧은 강섬유를 콘크리트에 분산 혼입함으로써 인장강도, 휨강도, 균열에 대한 저항성, 연성, 전단강도, 내충격성 등의 개선을 목적으로 하는 복합재료이다.

강섬유의 혼입으로 모르타르나 콘크리트의 강도 및 인성(靭性)의 역학적 성능을 개선시킬 수 있게 되었고, 파괴강도를 증진시키며, 콘크리트가 응력을 받았을 때 발생되는 콘크리트 내의 미세균열을 제어하거나, 큰 균열이 발생하였을 경우 균열이 일어난 콘크리트 양단의 벌어짐을 브리징(bridging) 현상으로 제어한다.

따라서, 본 연구에서는 순환골재를 사용한 콘크리트에 강섬유를 혼입하여 재료실험(압축강도, 인장강도, 내화도(耐火度)실험, 초음파속도실험)과 철근콘크리트 보 휨실험을 통하여 강섬유 보강효과 및 보 부재의 구조적 거동 특성을 규명하고 강섬유 보강 순환골재 콘크리트의 효율적인 이용에 대한 가능성을 제시하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방향

본 연구에서는 폐콘크리트 혼입률은 0%, 30%, 60%로, 강섬유는 1% 혼입한 시험체를 제작하여 재료실험과 보 실험을 실시한다.

재료 실험은 순환골재 혼입량별, 강섬유 보강 유무에 따라 Ø100㎜×200㎜의 원주형 공시체를 제작하여 재령별(7일, 14일, 28일, 60일)로 압축강도 실험과 인장강도 실험, 내화도 실험, 초음파속도실험 등을 통해 강섬유 보강 순환골재 콘크리트의 내구적 특성을 검토한다.

기존 연구는 원주형 공시체를 이용한 굳은 콘크리트의 내구적(耐久的) 특성을 검토하는 연구가 주로 진행되어져 왔으나, 본 연구에서는 강섬유 및 폐콘크리트를 사용한 철근콘크리트의 실제 구조물의 거동을 파악하기 위해 순환골재 혼입량별, 강섬유 보강 유무별로 축소형 철근콘크리트 보를 제작하여 휨 실험을 실시한다.

변수에 따른 재령별 재료실험 결과와 부재실험을 비교함으로써 순환골재 사용 콘크리트의 구조적 특성 변화를 파악한 뒤 순환골재를 사용한 콘크리트 품질의 실용성 및 순환골재의 사용 적정성을 제고(提高)하는 것이 연구의 기본 방향이다.

1.3 기존 연구의 동향

1.3.1 굳지 않은 순환골재 콘크리트의 특성

(1) 단위수량 및 슬럼프*(slump)*

순환골재 콘크리트는 사용되는 순환골재의 입형(粒形)이 불량하기 때문에 시공연도가 좋지 못하게 되어, 보통 콘크리트와 비교하여 동일 슬럼프를 얻기 위해서는 단위수량을 많이 필요로 하는 경향을 보였다.

일반적으로 순환골재 콘크리트의 슬럼프와 단위수량의 단계에서는 12cm 이하의 슬럼프를 가진 경우에는 순환골재 콘크리트의 종류에 따라 단위수량의 차이가 적으나, 18cm 이상의 높은 슬럼프의 순환골재 콘크리트에서는 차이가 명확히 나타난다.

또한 순환골재를 많이 사용한 콘크리트일수록 단위수량이 크게 증가되는데 이 값은 슬럼프 20cm에서 비교하면, 보통 콘크리트에서 약 190kg/m^3인데 비해 순환골재를 사용한 경우 8~22kg/m^3까지 증가함을 알 수 있다.

한편 Karaa(1986)는 건식제조된 순환골재 콘크리트는 시공연도가 줄어들고, 습식제조된 순환골재 콘크리트보다 더 빠르게 경화되지만 동일 물시멘트비에 대한 탄성계수와 압축강도는 거의 차이가 없었고, 순환골재 콘크리트의 경화 시간이 보통 콘크리트보다 다소 느리다는 것을 실험을 통해 밝혔다.

이 밖에도 Hansen(1989) 등의 연구에서는 동일 슬럼프를 확보하기 위해서는 순환골재 콘크리트의 경우 보통 콘크리트보다 14% 정도 많은 단위수량이 요구되며, 재생 굵은골재와 천연 잔골재를 사용한 순환골재 콘크리트의 경우에는 단위수량을 약 6% 증가시켜야 한다고 밝힌 바 있다.

이러한 단위수량의 증가는 콘크리트의 건조수축에 의한 균열을 발생시키는 원인이 될 수 있으므로 AE(Air-Entrained)제, AE감수제 사용 등으로 단위수량을 감소시킬 수 있는 방안을 모색하는 것도 중요하다.

(2) **공기량**

AE감수제를 사용한 보통콘크리트와 순환골재 콘크리트의 공기량을 비교하면 보통 콘크리트의 경우 전체적으로 공기량이 크고 공기량의 분포상황도 넓은 범위에 걸쳐 분포하게 되며, Mukai(1978) 등의 보고에 의하면 순환골재 콘크리트의 굳지않은 상태에서 공기량은 일반 보통 콘크리트에 비하여 많거나 변화폭이 크고, 단위용적질량 값은 약 2.02～2.21kg/ℓ로 나타난다.

또한 Narud(1983) 등의 보고에 의하면 순환골재 콘크리트의 공기량은 보통 콘크리트에 비하여 0.6% 정도 높게 나타나며, 단위용적질량의 경우 2.20～2.25kg/ℓ로 나타나 보통 콘크리트에 비하여 약 5～15% 낮은 값을 갖은데, 이는 순환골재의 입형이 나쁘기 때문에 갇힌 공기(entrapped air)가 많고 골재 자체의 공극량(空隙量)이 크기 때문으로 판단된다.

(3) **단위용적질량**

폐콘크리트를 파쇄하여 제조된 순환골재는 보통골재보다 비중이 낮기 때문에 이를 사용한 순환골재 콘크리트는 일반적으로 단위용적질량이 낮은 경향을 나타낸다.

콘크리트를 배합 직후 단위용적질량을 보통 콘크리트의 단위용적질량과 비교해 보면, 약 5～12% 정도 낮은 단위용적질량을 나타내고 있다.

이 값은 골재 중의 수분 및 단위수량이 보통콘크리트에 비하여 큰 값이므로 건조상태에서의 순환골재 콘크리트의 단위용적질량은 더욱 낮아질 것으로 예상할 수 있다.

(4) **잔골재율**

1급 순환골재 콘크리트의 잔골재율은 일본건축학회 「콘크리트의 조합설계 · 조합관리 · 품질검사 지침안 · 동해설(1986년)」에 나타난 강모래 · 쇄석(碎石) · AE 콘크리트와 거의 동일한 값을 나타내고 있으나, 이에 비하여 순환골재의 사용 비율이 높은 2급 및 3급 순환골재 콘크리트에는 잔골재율이 높아지는 경향이 있는데 1급 순환골재 콘크리트에 비교하여 2급은 1%, 3급은 2.8% 이상 큰 특징이 있다.

· 순환골재 콘크리트 I 급 : 18 ~ 21 MPa
· 순환골재 콘크리트 II 급 : 15 ~ 18 MPa
· 순환골재 콘크리트 III 급 : 15 MPa 미만

(5) 블리딩(bleeding)

순환골재 콘크리트의 블리딩은 보통 콘크리트에 비하여 단위수량이 많기 때문에 당초 블리딩이 커질 것으로 예상했지만 보통콘크리트에 비해 적게 나타나는데, 이는 폐콘크리트의 파쇄과정에서 발생하는 미립분량(微粒分量)에 의한 것으로서 미립분량이 2~7%의 범위에서는 강모래, 강자갈 콘크리트와 유사한 경향이나 미립분량이 10% 이상이 되면 미립입자의 보수(補修)작용에 의해 콘크리트 중의 수분이 미립분 입자의 표면에 흡착되기 때문이다.

또한 순환골재는 입형이 불량하고, 골재상호간의 가교(架橋)작용에 의해 침강(沈降)이 적어지기 때문에 블리딩의 저해 요인으로 되어, 블리딩 수가 골재 하부에 남는 비율이 강자갈을 사용한 콘크리트에 비해 많은 경향을 나타내며 블리딩 수가 골재 하부에 잔류하는 비율이 강자갈에 비해 많게 된다.

(6) 단위시멘트량

순환(循環)골재 콘크리트의 압축강도는 동일한 슬럼프의 확보를 위해 5%의 단위수량 증가가 필요하므로, 최소 보통 콘크리트와 동등한 압축강도를 위해서는 적어도 5%의 여분 시멘트를 필요로 한다고 가정하면 재생 굵은골재와 재생 잔골재로 만든 순환골재 콘크리트가 보통 콘크리트와 동등한 압축강도를 확보하기 위해서는 적어도 15% 이상의 단위시멘트량의 증가가 요구될 수 있다.

일반적으로 재생잔골재가 포함되어 있는 순환골재 콘크리트는 보통 콘크리트와 동일한 강도와 슬럼프를 얻기 위해 더 많은 시멘트를 필요로 하며, 이는 콘크리트 생산에 있어서 재생잔골재의 사용을 위한 시멘트의 과대한 소비가 비경제적이라는 측면에서 좋지 않은 결과를 초래할 수도 있다.

1.3.2 경화(硬化)된 순환골재 콘크리트의 특성

(1) 압축강도

저강도 범위일 경우, 순환골재를 사용한 콘크리트의 압축강도는 순환골재의 품질에 큰 영향을 받지 않지만 고강도 영역일수록 순환골재의 품질에 따른 차이가 증대하며, 콘크리트 덩어리를 간단히 파괴한 것일수록 강도발현(發現)은 낮다.

이러한 영향으로 아직까지 순환골재를 사용한 콘크리트에서 설계기준강도의 범위를 어느 단계까지 선정해야 하는 지를 판정할 수 있는 방법은 정하지 못한 실정이다. 따라서 인공경량골재에 대해 사용하고 있는 방법, 즉 물시멘트비가 40%인 보통 콘크리트의 재령 28일 압축강도로 판정하는 방법에 따른다.

일반적으로 순환골재 콘크리트의 압축강도는 사용한 골재의 종별에 따라 보통 콘크리트와 비교하여 1급 약 86%, 2급 약 75%, 3급 약 68% 정도이며, 강도 저하에 미치는 순환골재의 영향에 있어서는 재생굵은골재에 비해 재생잔골재가 상대적으로 영향이 큰 것으로 알려져 있다.

한편 흡수율이 5% 이하인 순환골재를 사용한 콘크리트의 경우 최대 40MPa로, 흡수율이 7%인 순환골재도 설계기준강도 24MPa까지 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

(2) 인장강도 및 휨강도

국내·외에서는 일반적으로 순환골재를 사용한 콘크리트는 인장강도가 저하되고, 특히 재생잔골재를 사용할 경우 이러한 현상은 더욱 두드러지며, 인장강도 저하율도 보통 콘트리트에 비하여 1급 순환골재 콘크리트는 1~6%, 3급 순환골재 콘크리트는 10~15% 정도 저하하는 것으로 알려져 있다.

Ravindrarajah(1985) 등의 연구결과에 따르면 재생 굵은골재와 재생 잔골재가 사용된 순환골재 콘크리트의 인장강도는 보통 콘크리트의 인장강도에 비해서 20% 정도 감소하는 것으로 보고되며, 순환골재 콘크리트의 인장강도(f_t)와 압축강도(f_c)의 관계는 보통 콘크리트와 유사하게 나타나 약 $f_t=(1/12\sim1/10)f_c$ 정도로, 물시멘트

비 10%의 변화에 대한 인장강도는 3~8%의 변화를 나타낸다.

한편 휨강도는 압축강도 대비 약 1/5~1/8의 범위로 보통 콘크리트와 거의 동등한 수준으로 나타나고 있으며, 순환골재 콘크리트의 인장강도와 휨강도는 보통 콘크리트에 비하여 약 10% 정도 낮은 값을 갖는 것으로 나타나고 있다.

또한 재생 굵은골재와 재생 잔골재를 함께 사용한 경우에는 순환골재 콘크리트의 휨강도가 일반 콘크리트에 비해 26% 정도 크게 감소하는 것으로 알려져 있다.

(3) 부착강도

3급 순환골재 콘크리트의 부착강도는 압축강도의 발현경향과 유사하고 이형철근과의 부착강도도 보통 콘크리트의 65~90% 정도로 보고되고 있으며, 수평철근의 부착강도는 수직철근의 부착강도를 약간 못미치는 것으로 보고되고 있다.

(4) 탄성계수

순환골재콘크리트의 탄성계수는 Frondistou-Yannas(1997)의 연구결과에 따르면 천연골재를 사용한 보통콘크리트에 비해 순환 굵은골재와 천연 잔골재를 사용한 순환골재 콘크리트의 탄성계수가 33% 정도 낮은 것으로 보고되고 있으며, Kakizaki(2001) 등의 연구결과에 의하면 순환골재 콘크리트의 탄성계수가 보통 콘크리트에 비하여 25~40% 정도 낮은 수준을 나타내고 있는 것으로 보고되고 있다.

콘크리트를 구성하는 시멘트 페이스트(paste)와 골재의 탄성계수를 비교하면 시멘트 페이스트의 탄성계수가 다소 낮다.

따라서 순환 굵은골재에 함유된 모르타르 성분이 많을수록 콘크리트의 전체에서 차지하는 시멘트 페이스트 양이 증가하기 때문에 순환골재 콘크리트의 탄성계수는 적어진다.

이러한 요인은 콘크리트 부재에서의 휨 및 크리프(creep)를 증대시킬 뿐만 아니라 건조수축을 증대시키는 원인이 되기도 한다.

순환골재 콘크리트의 탄성계수는 콘크리트의 비중과 압축강도에 의한 탄성계수 산정식으로부터 (1.1) 식과 같이 계산되며 재생굵은골재의 흡수율이 5%를 초과할

경우에는 현행의 탄성계수보다 낮다는 것을 알 수 있다.

$$E_c = 21{,}000 \times (\frac{a}{2.3}) \times \sqrt{f_c/200} \quad \text{.....(1.1)}$$

여기서, E_c : 휨 탄성계수(MPa)
a : 순환골재 콘크리트의 단위용적질량(kg/㎥)
f_c : 순환골재 콘크리트의 압축강도(MPa)

이와 같은 결론을 토대로 순환골재 콘크리트의 정탄성계수는 대략 1.5~3.0×10^4MPa로서 보통 콘크리트의 정탄성계수 2.1~3.9×10^4MPa와 약간 차이가 있다.

한편 Coquillat(1982), Hansen(1985)의 연구결과에 따르면 보통콘크리트에 비해 재생 굵은골재와 재생 잔골재를 사용한 순환골재 콘크리트의 동탄성계수가 14~28% 낮은 것으로 보고되어 탄성계수가 낮은 콘크리트를 재생한 골재를 사용할 경우, 일반 경량 골재 콘크리트와 비슷한 휨 탄성계수의 범위를 보이는 것으로 나타났다.

(5) 크리프(creep) 및 건조수축

Wesche(1986) 등의 보고에 의하면 순환골재콘크리트의 크리프는 보통 콘크리트의 약 50% 수준으로 나타나고 있는데, 이는 크리프는 주로 콘크리트의 모르타르 및 페이스트의 영향을 많이 받기 때문에 순환골재에 붙어있는 기존 모르타르의 영향인 것으로 판단된다.

순환골재 콘크리트의 크리프는 압축강도 25~50MPa의 수준에서 보통 콘크리트에 비하여 약 25~45% 정도 높은 값을 갖는 것으로 알려져 있다.

크리프 변형률은 물시멘트비가 증가함에 따라 상당히 증가하지만 순환골재 콘크리트와 보통 콘크리트 사이에 크리프의 차이는 어느 시점부터는 물시멘트비와 하중크기에 상관없이 거의 일정하다고 알려져 있다.

한편 순환골재 및 천연골재 콘크리트의 건조수축은 초기재령에서는 큰 차이가 없으나 장기재령으로 갈수록 차이가 커지며 재령 12주에서 순환골재 콘크리트의

건조수축값은 천연골재 콘크리트에 비하여 약 70~80% 정도 높은 값을 나타내고 있는 것으로 나타났다.

또는 Tam(1996) 등의 보고에 의하면 재령 90일에서 순환골재 콘크리트의 건조수축은 천연골재 콘크리트의 2배 정도이며 탄성계수의 값이 감소함에 따라 건조수축은 증가하는 것으로 나타났다.

(6) 내구특성

① 동결융해 저항성

보통 콘크리트의 동결융해 저항성은 공기량에 의해 좌우되지만, 충분한 공기량이 연행(連行)된 경우에도 골재의 품질이 나쁘면 동결융해 저항성이 저하되기 때문에 KS F 2573(콘크리트용 재생 골재, 2006.12)에서는 강자갈의 경우에 흡수율을 3% 이하로 규정하고 있다.

순환골재 콘크리트의 경우 4%의 공기를 연행하여도 보통 콘크리트에 비하여 낮은 동결융해 저항성을 갖는 것으로 나타났다. 이는 순환골재의 품질이 열악하기 때문인 것으로 사료되며 이에 대한 대책으로서, 물시멘트비를 낮추거나 AE제 또는 AE 감수제 등을 사용할 경우 양호한 내동결성(耐凍結性)을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

② 중성화(中性化)

B.C.S.J(1981) 등의 연구에 의하면 이미 탄산화(炭酸化) 및 염해(鹽害)를 겪은 원 콘크리트에서 제조된 순환골재를 사용한 순환골재 콘크리트의 중성화 산화율은 천연골재 콘크리트의 중성화 산화율보다 약 65% 정도 더 높은 값을 가지므로, 철근콘크리트구조물에서 철근을 빨리 부식시킬 것으로 예상된다.

따라서 순환골재 콘크리트의 중성화를 억제하기 위해서는 물시멘트비를 낮추는 등의 고려가 필요할 것으로 사료된다.

③ 투수성(透水性)

콘크리트의 성능저하는 대개 투수성과 직접적인 관계가 있는데, 슬럼프 21cm, 물시멘트비 50~70% 순환골재 콘크리트의 투수실험 결과, 보통 콘크리트에 비해

약 2~5배 정도 높은 값을 나타내고 있으며 값의 변동도 매우 크게 나타났다.

한편 Rasheeduzzafar(1984) 등의 연구결과에 따르면 순환골재 콘크리트의 낮은 강도와 높은 흡수성 등의 특성은 보통 콘크리트보다 물시멘트비를 5~10% 낮게 배합함으로써 극복할 수 있다고 하였다.

높은 물시멘트비에서는 순환골재 콘크리트와 보통 콘크리트의 흡수량에는 큰 차이가 없으나 낮은 물시멘트비(고강도)에서는 순환골재 콘크리트의 흡수량이 천연골재로 만든 보통 콘크리트의 흡수량보다 약 3배 정도 증가하는 것으로 보고되고 있다.

또한 순환골재 및 보통 콘크리트가 동일한 압축강도일 경우에는 투수저항성이 유사하며, 순환골재의 흡수율이 높을수록 투수저항성은 낮아지는 것으로 나타나, 순환골재 콘크리트의 투수저항성을 높이기 위해서는 흡수율이 낮은 양질의 골재사용 및 물시멘트비를 낮추는 등의 대책이 필요할 것으로 사료된다.

1.3.3 강섬유 보강 콘크리트의 특성

1) 재료

강섬유 형상비, 혼입률 및 형상이 강섬유보강 콘크리트의 강도증진에 미치는 영향에 대해서 알아보기 위하여, 총 7편의 논문을 비교, 검토하였다. 강섬유 보강 콘크리트의 재료특성에 관한 대표적인 장동일(2000)[1], 박승범(1997)[2], 문제길(1994)[3] 서상교(1994)[4], 부척량(1990)[5], 오병환(1990)[6] 및 정환옥(1987)[7]의 연구내용에서 강

1) 장동일 외 3인, “강섬유 보강 고강도콘크리트의 응력-변형률 곡선 및 탄성계수 추정식 평가”, 한국콘크리트학회 논문집, 제12권 2호, pp13~20, 2000.4
2) 박승범 외 3인, “플라이애시를 이용한 강성유 보강콘크리트의 강도 및 휨인성 특성에 관한 실험적 연구”, 한국콘크리트학회 학술발표논문집, pp345~350, 1997
3) 문제길 외 1인, “섬유보강콘크리트 보의 전단거동에 미치는 강섬유의 효과”, 한국콘크리트학회 논문집, 제6권 2호, pp118~128, 1994.4
4) 서상교, “강섬유보강 콘크리트의 균열 이후의 인장거동에 관한 실험적 연구”, 한국콘크리트학회 논문집, 제3권 1호, pp79~85, 1991.3
5) 부척량 외 3인, “강섬유 보강 콘크리트의 압축응력-변형률 특성에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회 논문집, 제6권 6호, pp295~307, 1990.12
6) 오병환 외 3인, “강섬유보강 콘크리트의 강도 및 역학적 특성연구”, 한국콘크리트학회

섬유의 형상은 직선형에서, 양단고리형 그리고 최근의 원형까지 다양하게 변천되었고, 형상비, 혼입률(混入率)이 재료특성에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

압축강도는 직선섬유의 경우 혼입률(V_f) 2.0%까지 강도가 증가하였으며, 양단갈고리형은 혼입률(V_f) 1.5%까지 강도증진 후 혼입률(V_f) 2.0%에서 강도가 떨어지는 것을 볼 수 있었다. 압축강도에 있어 강섬유의 길이가 증가함에 있어 강도증진효과는 거의 차이가 없는 것으로 나타났으며, 이는 1996년 박승범의 연구결과에서 확인할 수 있었다.

그리고 혼입률이 증가함에도 불구하고 압축강도가 떨어지는 현상이 나타나는데, 이는 강섬유가 콘크리트에 골고루 분산되지 않는 섬유뭉침(Fiber-Balling)으로 인하여 강도가 감소된 것으로 판단된다.

쪼갬인장강도는 V_f 2.0%까지 선형적으로 강도증진 양상이 나타났으며, 섬유길이가 40mm이상일 때, 직선형 강섬유보다 양단갈고리형의 강섬유가 강도증진이 우수한 것으로 나타났다.

휨강도는 V_f 2.0%까지 쪼갬인장강도보다 우수한 강도증진을 보였고, 40mm이상의 강섬유, 양단갈고리형의 강섬유가 직선형 형상보다 강도 증진효과가 크게 나타났다.

이는 강섬유가 콘크리트의 균열면을 잡아주는 브리징(bridging) 효과에 있어 길이가 짧은 강섬유보다 긴 강섬유가 콘크리트와 부착력을 증가시켜 휨 및 인장강도 증진에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

2) 보

강섬유 보강 콘크리트 보는 일반 콘크리트 보에 비하여 초기 균열 전단강도 및 최대 전단강도가 증가하며, 특히 스터럽(stirrup)과 강섬유를 동시에 보강했을 경우에 훨씬 효과적이라고 보고되고 있다.

또한 일부 연구 결과는 강섬유 혼입량으로 부재체적의 1%를 추천하고 있으며 주

학술발표논문집, 제2권 2호, pp175~178, 1990.11

7) 정환옥 외 1인, "강섬유 보강 모르타르 및 콘크리트의 변형성상에 관한 연구" 대한건축학회 학술발표논문집, 제7권 2호, pp579~582, 1987

요한 연구결과는 다음과 같다.

Batson 등(1972)이 100mm × 150mm × 2,000mm 크기의 강섬유 보강 콘크리트 보를 사용하여 파괴시의 전단강도 효과가 강섬유를 혼입하지 않은 경우에 비해 최고 27% 증가한다고 발표한 이후, Williamson(1978)는 강섬유가 사인장(斜引張) 파괴를 휨 파괴로 전화시킬 수 있을 만큼의 전단강도를 증진시킬 수 있으므로 스터럽의 경제적인 대안으로 강섬유를 제시하였다.

Sharma(1986)는 SFRC 보의 예상평균전단응력 V_{cf}를 제안했으며, Narayanan(1987)은 자신들의 실험성과와 다른 연구들에서의 실험자료를 회귀분석해 SFRC 보의 균열전단강도와 최대전단강도 추정식을 제안했다.

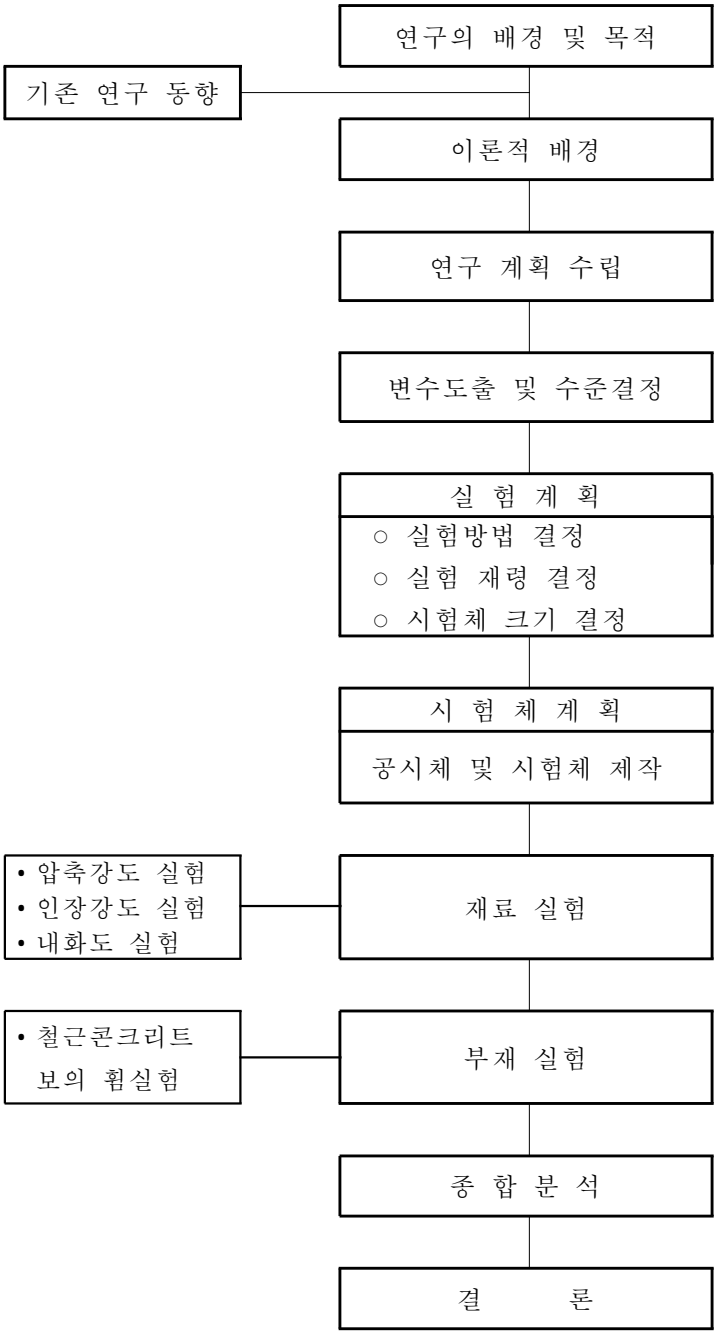
또한, Samir(1992)는 전단보강근이 없는 고강도 SFRC 보의 예상전단강도를 제안했다.

전단보강철근이 있는 보의 경우 스터럽의 전단보강량과 콘크리트의 압축강도를 일반화시켜 전단경간비(a/d)와 강섬유 혼입률에 대하여 정리한 결과 전단경간비 a/d가 1.5인 경우 강섬유 혼입률이 1.5%까지 증가함에 따라 전단저항능력이 계속 증가되는 것으로 나타났다.

또한 전단경간비 a/d가 2.6이상인 경우 강섬유 혼입률의 증가에 따른 전단보강효과의 증진은 미비한 것으로 나타났다.

1.4 연구 진행 흐름도

본 연구를 수행하기 위하여 진행된 연구 흐름도는 다음과 같다.

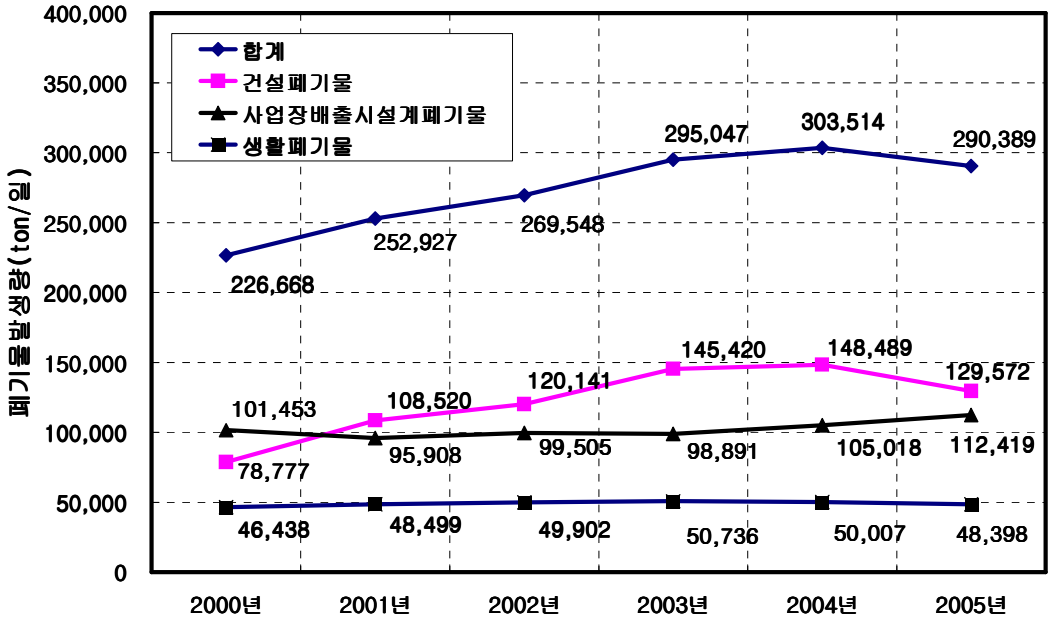


[그림 1.1] 연구 진행 흐름도

Ⅱ. 이론적 연구

2.1 폐기물 발생현황

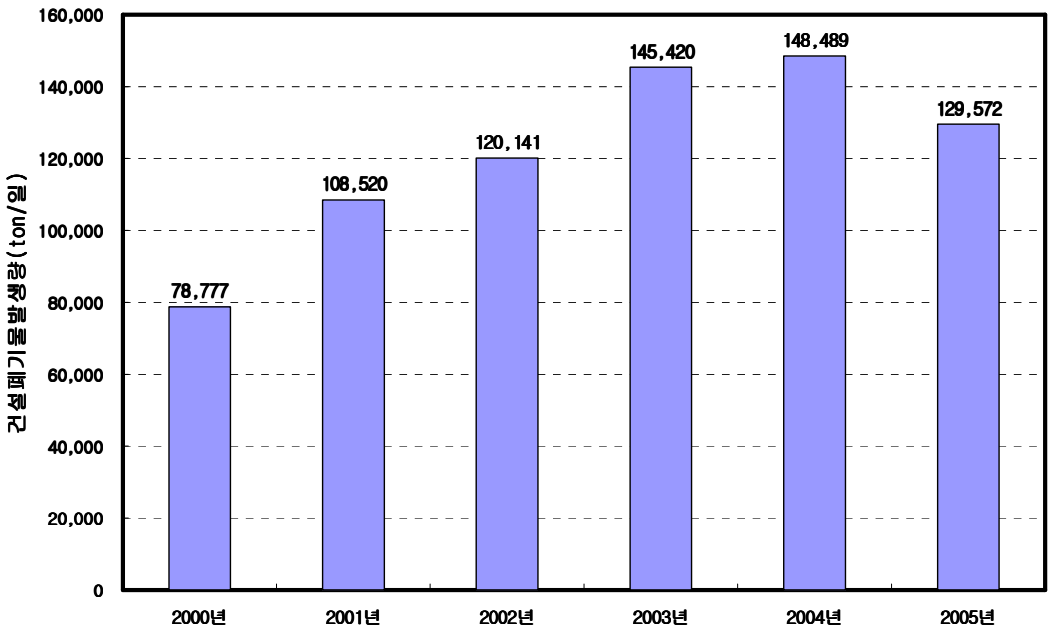
폐기물의 종류는 생활폐기물, 건설폐기물, 사업장 배출시설계폐기물으로 구분되며 2005년도 폐기물의 구성비를 생활폐기물이 16.7%, 사업장배출시설계폐기물이 38.7% 정도, 건설폐기물이 44.6%으로 건설폐기물이 가장 큰 구성비율을 차지하고 있다.



[그림 2.1] 폐기물 종류별 구성비율

모든 폐기물의 연도별 발생량은 증가하는 경향을 보였으며, 특히 건설폐기물은 총 폐기물 발생량의 2000년도 34.8%에서 2004년 48.9%으로 9.8%정도 증가하였다.

2004년 이후 건설 폐기물 발생량이 감소하였는데 이는 2004년 이후 건축허가현황과 주택건설실적이 전년도에 비해 각가 5.1%, 6.1%정도 감소하였기 때문으로 추정된다.



[그림 2.2] 건설폐기물 발생량

<표 2.1>은 2005년 「건설폐기물의 재활용촉진에 관한 법률」에 의거 건설폐기물 성상 분류기준 변경전의 건설폐기물 성상현황이며 크게 가연성 폐기물과 불연성 폐기물로 분류되었다.

<표 2.2>는 2005년 「건설폐기물의 재활용촉진에 관한 법률」에 의거 건설폐기물 성상 분류기준 변경된 건설폐기물 성상현황이다.

2005년도 건설폐기물의 성상은 건설폐재류 69.7%, 가연성 건설폐기물 3.6%, 비가연성 건설폐기물 0.4%, 건설폐토석 5.1%, 혼합건설폐기물 21.1%를 차지하는 것으로 나타났다.

그중 건설폐재료 중 폐콘크리트가 전체 건설폐기물 중에서 57.5%으로 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 다음으로 혼합건설 폐기물이 21.1%를 차지하고 있다.

<표 *2.1*> *2000~2004*년 건설폐기물 성상현황

(단 위 : ton/일)

구 분		2000년	2001년	2002년	2003년	2004년
총 계		78,777	108,520	120,141	145,420	148,489
가연성	나 무 류	2,367	3,111	2,632	2,534	3,248
	합성수지류	1,311	1,821	1,800	1,445	1,687
	종 이 류	591	557	507	452	478
	기 타	938	1,260	1,113	1,376	1,608
	소 계	5,207	6,749	6,053	5,807	7,021
불연성	금 속 류	1,087	1,316	1,323	922	1,025
	유 리 류	181	304	430	354	313
	기 타	1,239	1,491	10,343	7,722	7,842
	건설폐재류	71,063	98,660	101,992	130,615	132,288
	소 계	73,570	101,771	114,088	139,613	141,468

<표 *2.2*> *2005*년 건설폐기물 성상현황

(단 위 : ton/일)

구 분		2005년
총 계		129,572
건 설 폐재류	폐 콘 크 리 트	74,757
	폐 아 스 팔 트 콘 크 리 트	15,172
	기 타	399
	소 계	90,328
가 연 성 건설폐기물	폐 목 재	3,676
	폐 합 성 수 지	1,003
	기 타	22
	소 계	4,701
비가연성 건설폐기물	건 설 오 니	398
	기 타	97
	소 계	495
건 설 폐 토 석		6,657
혼합건설폐기물		27,391

2.2 건설폐기물 처리 및 재활용 현황

<표 2.3>은 건설폐기물의 처리방법 변화추이를 나타난 것이며 건설폐기물의 처리방법은 매립, 소각(燒却), 재활용으로 구분할 수 있으며, 2000년 이후 매년 매립에 의한 처리는 감소하고 있으며, 재활용은 증가하고 있다.

이는 폐기물 재활용에 대한 각종 정책 및 기술개발에 의한 것으로 판단된다. 건설폐기물의 주요 재활용은 목재, 철재, 유리 등의 재활용 품목이 대부분이고 폐콘크리트와 적벽돌은 일반 성토재로 주로 활용하고 있다.

<표 *2.3*> 건설폐기물의 처리방법 변화 추이

(단 위 : ton/일)

구 분	2000년		2001년		2002년		2003년		2004년		2005년	
		%		%		%		%		%		%
계	78,777	100	108,520	100	120,141	100	145,420	100	148,489	100	129,572	100
매 립	10,021	12.7	12,943	11.9	17,462	14.5	13,715	9.4	10,976	7.3	3,290	2.6
소 각	2,071	2.6	2,424	2.3	2,462	2.1	2,233	1.5	2,949	2.0	862	0.7
재활용	66,685	84.7	93,153	85.8	100,209	83.4	129,462	89.0	134,557	90.7	125,327	96.7
해역(海域)배출					8		10		7		93	

2.3 콘크리트용 순환골재의 특성

(1) 순환골재의 분류

순환골재에는 원콘크리트에 사용되었던 원래의 골재(원골재) 외에 여러 가지 물질이 혼입되어 있기 때문에 원골재의 성질보다 오히려 혼입되어 있는 물질의 종류와 양이 순환골재의 품질을 지배하게 된다. 순환골재에 혼입되어 있는 물질은 다음과 같이 세 가지로 분류할 수 있다.

① 골재입자에 부착된 모르타르 또는 시멘트페이스트

② 건축물 해체시 혼입된 종이, 나무, 유리, 타일, 벽돌, 아스팔트 등의 불순물

③ 해체현장 및 순환골재 제조공장에서의 취급시 혼입되는 토사(土砂)

또한 재생굵은골재는 입자의 구성에 따라 원굵은 골재로 구성된 것, 원굵은골재에 일부 원 모르타르가 부착되어 있는 것, 원 콘크리트로 구성된 것, 원 모르타르로만 구성된 것으로 추정할 수 있으나, 콘크리트 공시체의 절단면 관찰결과로부터 순환골재의 구성은 모르타르분과 원 콘크리트 내의 자갈이 반반 정도로 구성되어 있음을 알 수 있다.

이것을 정량적으로 확인하기 위해서 조크러셔(Jaw crusher) 개조기(改造機)로 제조한 1차처리 재생굵은골재(10～20mm)의 입자 25개의 비중·흡수율을 측정한 결과, 골재의 입자는 2개의 그룹으로 나누어지는 것을 알 수 있다.

즉 순환골재는 굵은골재와 모르타르 입자로 구성되고, 모르타르 입자의 품질과 그 비율이 재생굵은골재의 품질을 규정한다고 할 수 있다.

(2) 순환골재에 부착된 시멘트페이스트

골재에 붙어 있는 모르타르의 부피 백분율을 ASTM D - 457.71의 선형이동법(Linear Traverse Method)을 이용하여 구하면 파쇄방법과 원콘크리트의 종류에 따라서 차이가 있으나, 16～32mm 굵은골재에서는 25～35%, 8～16mm에서는 약 40%, 그리고, 4～8mm 순환골재에서는 60% 정도이다.

재생굵은골재의 처리횟수를 증가시켰을때 입자의 흡수율 분포 7% 정도 이상의

것은 모르타르 입자로 생각해도 좋다. 순환골재의 제조에 있어서 처리횟수가 많을수록 파쇄(破碎) 및 연마(硏磨)의 반복에 의해 모르타르 입자는 파쇄되어 잔골재로 되고, 또한 원골재에 부착한 모르타르가 떨어져 나감으로써 원골재 입자 또는 원골재에 가까운 입자의 비율이 많아지는 것을 알 수 있다.

(3) 순환골재의 불순물 및 미립분(微粉分)

순환골재에 혼입된 불순물 및 미립분은 <표 2.4>에 나타난 바와 같이 배우 다양하다. 건축물의 경우 해체시 콘크리트 외에 여러 가지 재료가 혼입되기 때문에 주의가 필요하다.

<표 *2.4*> 순환골재에 혼입된 불순물

종류 / 비고	금속	석재	타일 벽돌	유리	이분 *(泥分)*	아스팔트 콘크리트	모르타르	신더*(cinder)*경량 콘크리트	기포콘크리트
비 중	7.8	2.5	2.5	2.5	2.3	2.3	2.1	1.9	0.5
불순물량 (%)	~4.9	~5.9	~3.9	0~1	5	5	0.7~4.0	0~20.9	0.06
종류 / 비고	석고	플라스틱	목재	도료 수지	아스팔트 방수층	지포 *(紙布)*	단열재	기타	
비중	1.6	1.6	1.3	1.1	1.9	0.45	-	0.05	
불순물량 (%)	2.1~9.1	~9.1	~0.53	~0.39	~1.0	~0.39	~0.23	~1.0	

금속은 대부분 강(鋼)으로서 철근 외에 각종 금속류가 있으며, 이러한 금속재료는 순환골재의 처리공정을 어렵게 하는 원인이 된다.

석재, 타일, 벽돌, 유리는 골재와 비중이 비교적 가깝고 화학적으로 안정적이기 때문에 콘크리트에 대한 악형향은 거의 없지만, 유리는 작업자에게 해를 미치는 경우가 있다.

모르타르 또는 경량 콘크리트를 다량 혼입하지 않을 경우 악영향은 크지 않다.

미분(微分)은 해체현장으로부터 콘크리트에 부착하게 되는데 이는 콘크리트의 특성을 크게 저해하므로 반드시 씻기시험이나 점토괴량시험으로 확인할 필요가 있다.

석고, 석고 플라스터(plaster)는 콘크리트에 유해하지만, 굵은골재에 혼입되는 경우

는 그다지 많지 않다.

문제가 되는 것은 플라스틱, 아스팔트, 도료 목재, 종이, 천, 단열재와 같은 유기불순물로서 콘크리트에 큰 악영향을 미친다. 따라서 순환골재를 제조하는 과정에서 이들의 제거가능 여부가 순환골재의 품질을 결정하는 매우 중요한 요소가 된다.

순환골재에 포함된 미분은 통상 0.15mm 이하의 것을 의미한다. 습식분급(濕式分級)의 방식은 그 양이 적지만, 건식(乾式)의 경우에는 씻기 손실량만도 5% 정도 된다. 미분의 화학분석 결과는 <표 2.5>에 나타낸 바와 같으며, 미분으로부터 추측하면 미분에는 잔골재 성분이 약 50% 포함되어 있다.

<표 *2.5*> 미분*(微粉)*의 화학적 분석결과

화 학 적 성 분*(%)*					
불용성물질 (Insol)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	Na_2O_3
49~69	44~53	9~11	1~4	17~23	2~3

1993년에서 1996년 사이에 재생골재의 불순물 함유량에 관한 많은 연구가 오상근 및 김무한에 의해서 수행되었으며, 천연골재와 순환골재에 부착되어 있는 다양한 오염물질이 콘크리트의 강도에 영향을 미치는 연구결과를 발표하였다.

<표 2.6>는 콘크리트의 강도를 15% 감소시키는 오염물질의 양을 용적비로 나타낸 것이다.

타일이나 유리조각 불순물은 순환골재 콘크리트 압축강도에 매우 미세한 영향을 미치지만 석고는 영향이 비교적 크며, 용적으로 약 3% 혼입되어 있을 경우 콘크리트 강도의 15% 정도를 감소시키게 되는데 이는 석고가 물에 닿으면 연화(軟化)되기 때문이다.

점토, 페인트, 아스팔트, 목재 또한 콘크리트의 강도를 감소시키게 된다. 일본에서 규정하고 있는 순환골재에 포함되는 유해물의 한도는 <표 2.7>과 같다.

<표 *2.6*> 보통 콘크리트에 비해 *15%*의 압축강도를 감소시킨 혼합물의 체적율

혼합물	회반죽	흙	나무	석고	아스팔트	페인트
골재에 대한 부피비(%)	7	5	4	3	2	0.2

<표 *2.7*> 유해 혼합물의 최대량

골재의 형태	회반죽, 진흙과 기타 혼합물의 밀도가 1,950kg/㎥ 미만인 것.	아스팔트, 플라스틱, 페인트, 등의 밀도가 1,200kg/㎥ 미만인 것.
재생 굵은골재	10kg/㎥	2kg/㎥
재생 잔골재	10kg/㎥	2kg/㎥

2.4 강섬유 보강 콘크리트의 개요

콘크리트는 하중을 받을 때 취성적인 성향을 나타내며, 균열의 발생 및 진행을 억제하기 힘든 단점이 있다. 따라서 취성적인 성향을 연성적으로 유도하고, 균열의 발생 및 진행을 억제하기 위하여 강(鋼)섬유를 콘크리트에 혼입한 강섬유 보강 콘크리트가 사용된다,

콘크리트에 강섬유를 혼입함으로써, 콘크리트를 균질(均質)하게 만들고, 취성(脆性)적 성질을 연성(延性)적인 성질로 변환시켜 준다. 강섬유는 일정치 않은 방향성과 섬유조직 내에서 좁은 간격을 가지고 있기 때문에 균열사이를 연결하는 것과 균열이후 연성을 제공하는데 있어서 일반적인 보강재보다 효과적이다.

강섬유로 보강된 콘크리트는 인장강도, 변형능력, 피로파괴, 충격저항력, 에너지 흡수력, 균열 저항력 및 내구성을 증가시킨다. 그러므로 강섬유는 포장도로(고속도로, 주차장, 활주로, 교량 바닥판)와 공장의 바닥, 콘크리트 구조물의 보수, 터널안 보수보강 등 다양한 목적으로 이용될 수 있다.

시멘트페이스트 및 콘크리트에 혼합재료로서 사용되는 섬유의 종류는 강섬유, 내알칼리유리섬유, 폴리에틸렌섬유, 폴리프로필렌섬유 등이 있으며, 주로 직경 0,3~0.6mm, 길이 20~50mm 정도의 강섬유가 가장 널리 사용된다.

2.4.1 섬유 종류와 특성

섬유보강 콘크리트에 사용되는 섬유의 종류는 강(steel), 유리(glass), 폴리프로필렌(polypropylene), 폴리에틸렌(polyethylene), 탄소(carbon), 나일론(nylon) 등이 있다.

(1) 강섬유(Steel Fiber)

원형 강섬유는 직경 0.25~0.8mm의 강선을 잘라서 만들고, 평 강섬유는 두께 0.15~0.41mm, 폭 0.29~0.9mm의 강판을 자르거나 강선을 펴서 만든다. 콘크리트에 강섬유의 혼입률은 0.5~2.0% 정도로 하고, 길이는 25mm이상(형상비 75~100)을 사용한다.

강섬유 혼입률과 형상비(L/D:강섬유의 길이/강섬유의 직경)가 클수록 강섬유 보강 콘크리트의 시공성(Workability)은 좋지 않지만 혼입률의 증가와 분포가 균등하

면 역학적 성질은 크게 향상된다. 이를 주로 사용하는 곳은 고속도로 포장, 공항 활주로, 내화성 콘크리트, 터널의 라이닝(lining) 등이다.

(2) 유리섬유(Glass Fiber)

유리섬유는 직경 0.005~0.015mm의 여러 다발을 묶어서 사용한다. 콘크리트에 혼입된 유리섬유는 화학적으로 불안전하여 양생기간에 따라 콘크리트내의 유리섬유의 강도가 저하되는 경향을 나타낸다. 유리섬유의 인장강도는 1,033~4,000MPa, 탄성계수는 69,000MPa 정도로 나타난다. 이는 주로 프리캐스트(precaste) 제품, 커튼월, 얇은 쉘(shell) 구조물 등에 이용되고 있다.

(3) 유기물 섬유(Organic Fiber)

일반적으로 유기물 섬유는 직경 0.02~0.38mm로 나일론(nylon), 폴리프로필렌(polypropylene), 폴리에틸렌(polyethylene)등이 이용된다. 이는 화학적으로 안정적이며 다른 섬유에 비해 중량이 가벼우나 강도가 다소 낮게 나타난다.

2.4.2 강섬유 분포특성

강섬유가 혼입된 콘크리트의 인장파괴는 강섬유의 수가 가장 적은 부분에서 일어난다. 그러므로 강섬유는 콘크리트에 일정하게 분포시키는 것이 바람직하다. 하지만 강섬유를 혼입하는 과정에서 Fiber Ball[8]이 발생하기 때문에 이것이 많이 발생한 부분에서는 강섬유의 혼입 효과가 거의 나타나지 않는다. 이 Fiber Ball을 발생시키는 주요 요인은 강섬유의 형상과 크기이며, 강섬유의 단면이 1.0mm이상이고 직경이 큰 것은 강섬유형상비(Aspect Ratio)가 100이상인 경우에도 Fiber Ball이 발생하지 않는다.

그리고 직경이 작고 형상비가 커질수록 Fiber Ball이 발생하기 쉬워서 강섬유의 분포가 일정하지 않게 된다.

이러한 Fiber Ball을 발생시키지 않기 위해서 가장 중요한 것이 배합순서인데 이는 연구자에 따라 조금씩 다르지만 보통 콘크리트를 배합한 다음에 강섬유를 혼입하는 것이 일반적이다.

---

8) Fiber Ball : 섬유가 뭉치는 현상

2.4.3 강섬유 배열 특성

강섬유의 배열 방향과 기울기는 콘크리트의 역학적인 특성에 큰 영향을 미치며, 이러한 분포방향은 강섬유보강 콘크리트의 인장강도보다는 균열 억제에 더 큰 영향을 미친다. 즉 강섬유방향이 응력과 수직으로 되어 있다면 인장응력을 초과한 후에는 균열확장을 억제하지 못하며, 응력방향과 평행하면 인장응력이 약 30%정도 더 크게 나타난다고 보고되고 있다.

콘크리트에 혼입된 강섬유의 배열은 다짐방법, 부재의 크기 및 강섬유형상비 등이 주로 영향을 미친다.

거푸집에 콘크리트를 타설할 때 진동기로 진동다짐을 하면 강섬유는 거푸집에 평행하거나 중량방향의 직각으로 배열하려는 경향이 있다. 이것은 진동시간이 길수록 더욱 그러한 성향을 나타낸다.

부재의 단면이 작으면 거푸집 가까이에 있는 강섬유는 거푸집에 평행하게 배열하려는 경향이 있으므로 부재의 길이 방향으로 배열하게 된다.

2.4.4 강섬유 형상비와 혼입률 특성

강섬유의 형상비는 인장강도에 대한 영향이 작은 반면에 균열이후의 균열억제나 강도에 상당한 영향을 미친다. 이는 콘크리트가 파괴될 때 강섬유의 파단에 의한 것보다 인발에 의한 영향이 더 크기 때문이다. 혼입률이 증가함에 따라 강도나 역학적 특성이 상당히 향상된다고 여러 연구논문에 발표되어 있다. Balaguru(1992)는 강섬유 혼입률을 증가시킴에 따라 인장강도와 탄성계수가 각각 160%, 80%로 증가되고, 압축, 휨, 전단강도도 각각 20%, 90%, 80%까지 증가한다고 발표하였다.

2.5 강섬유 보강 콘크리트의 기본이론

강섬유보강의 기본 개념은 콘크리트 내에 강섬유의 혼입으로 부착력에 의해 균열확산을 억제하고, 취성적인 재료를 연성적인 재료로 변환하는 것이다.

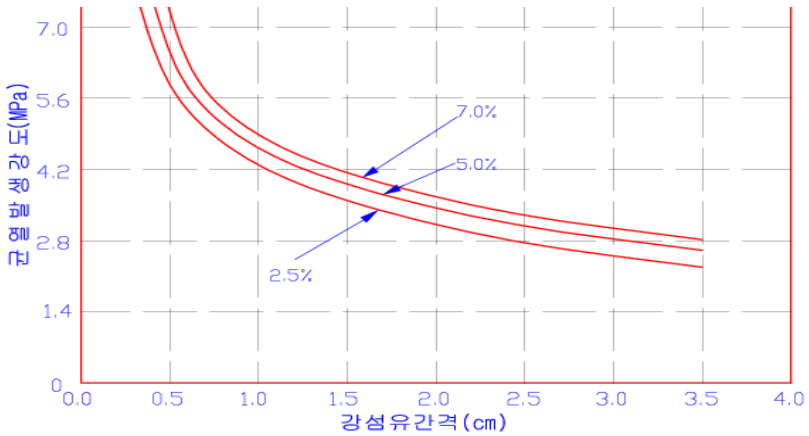
강섬유보강 콘크리트의 균열억제와 강도 향상에 대한 기본이론은 강섬유의 간격

에 의해 좌우되는 강섬유간격 이론, 균열강도가 강섬유의 체적, 방향 및 형상비에 관계하는 복합체 이론, 강섬유의 혼입에 따른 철근콘크리트보의 전단응력 이론 등이 있다.

2.5.1 강섬유 간격 이론

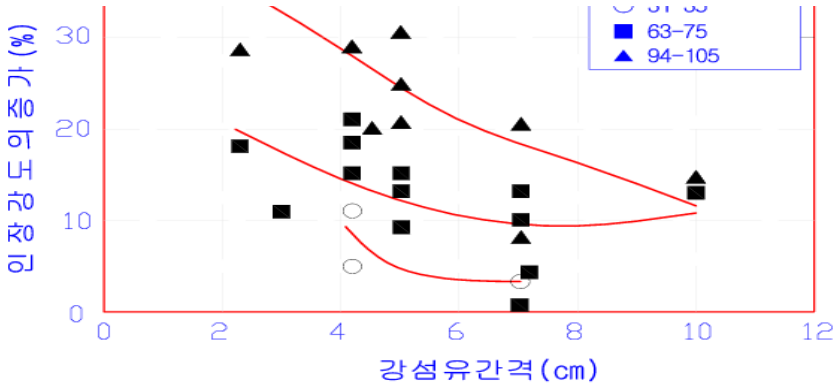
콘크리트나 모르타르의 강도 향상은 연성을 증대시키거나 균열의 크기를 작게하여 내부균열에 응력집중을 감소시킴으로써 이루어진다.

균열억제 방법으로는 Romualdi와 Batson[9]은 모르타르에 강섬유를 혼입하여 응력집중계수로 감소시킴으로써 인장강도를 증가시켰다. [그림 2.3]은 응력집중계수를 변수로 하여 이론적으로 전개한 결과로 강섬유간격이 좁아질수록 인장강도가 증가하는 것을 알 수 있다.



[그림 2.3] 이론적인 인장강도

9) Romualdi, J. P., and Batson, G. B., Mechanics of Crack Arrest in Concrete, Proceeding ASCE, Vol. 89, EM3, pp. 147-168, 1963.



[그림 2.4] 강섬유간격에 따른 인장강도의 변화

Romualdi와 Mandel[10]은 모르타르에 강섬유를 매우 밀실하게 혼입한 실험으로 강섬유 간격이 균열강도에 지배적인 영향을 미침을 확인하였고, 유효 상한값의 간격으로는 1.12cm인데, 이 값을 0.76cm이하로 하면 균열강도가 급격히 증가함을 보였다.

이들은 강섬유의 간격 S는 임의의 단면내에 있는 인장응력에 유효한 평균거리이며 다음과 같이 제안하였다.

$$S = 13.8d\sqrt{1/V_f} \qquad (2\text{-}1)$$

여기서 d : 강섬유의 직경(㎝)

V_f : 강섬유 혼입률(%)

S : 인장응력에 유효한 평균거리(㎝)

한편, Johnson과 Coleman[11]은 인장강도와 강섬유간격과의 관계를 그림2.2와 같

10) Romualdi, J. P., and Mandel, J. A., Tensile Strength of concrete Affected by Uniformly Distributed and closely Space Short Length of Wire Reinforcement, ACI Journal, Vol. 61, No. 6, pp. 657-672, 1964.

11) Johnson, C. D., and Coleman, Properties of Fiber Reinforced Mortar in Uniaxial Tension, ACI SP-44,

이 구했다. 그림에 의하면 강섬유형상비 33정도일 때 강섬유간격이 10mm이상이면 강섬유 보강에 의한 인장강도의 증가는 거의 없으며 강섬유형상비가 100인 경우 강섬유 간격 8mm가 인장강도가 크게 증가하는 것을 알 수 있다.

2.5.2 강섬유복합체 이론

강섬유 보강 콘크리트의 비례한도는 본질적으로 재료가 선형적인 탄성을 나타내는 상한의 하중으로 생각되며, 이 한도 이하에서는 모재(母材)에 미소균열이 거의 생기지 않는다고 할 수 있다. 즉, 보통콘크리트와 강섬유보강 콘크리트는 비례한도까지는 탄성적이므로 이 한도는 균열발생강도와 같은 응력에서 나타난다고 가정할 수 있다.

강섬유 혼입률과 균열발생 강도의 증가는 선형으로 알려졌으며, 탄성계수도 복합재료와 같은 방법이 적용되어 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$E_c = \Phi E_f V_f + E_m V_m \tag{2-2}$$

여기서, E_c : 복합재료의 휨 탄성계수(MPa)

Φ : 합성효과계수

E_f : 강섬유의 휨 탄성계수(MPa)

V_f : 강섬유의 체적비(%)

E_m : 콘크리트 또는 모르타르 휨 탄성계수(MPa)

V_m : 콘크리트 또는 모르타르 체적비(%)

위의 식은 강섬유가 긴 연속섬유이고, 콘크리트 속에서 미끄러짐이 없을 경우에 성립되며, 강섬유의 길이가 한정되어 있기 때문에 비례한도 이전의 미세균열 발생에 대하여는 설명할 수 없다. 따라서 강섬유보강 콘크리트의 휨 탄성계수와 비례한도의 상한만을 나타낼 수 있다.

2.6 강섬유 보강 콘크리트의 역학적 특성

2.6.1 압축강도

보통콘크리트에 강섬유를 혼입하여 [그림 2.5]와 같이 강섬유 혼입률이 증가되면 압축강도가 증가한다. 이러한 증가는 골재의 최대크기에 따라 변하는데 골재의 최대치수가 클수록 강섬유의 증가에 따른 압축강도의 증가비가 커진다.

그러나, 골재의 최대치수가 일정하면 공시체의 성형이나 컨시스턴시(Consistency)에 따라서 달라지는 경우가 있기 때문에 콘크리트의 품질관리 특성치로써 압축강도를 이용하기 어렵다.

Williamson은 Ø150mm×300mm의 원주형 모르타르와 콘크리트에 대한 압축실험을 하였다. 모르타르에서는 강섬유 혼입률에 따른 강도의 증가성향이 일정하지 않았는데 최대골재치수 9.5mm를 사용한 콘크리트 공시체는 강섬유 혼입률 2.5%에서 16%의 압축강도가 증가하였고, 최대골재치수 19mm를 사용한 경우에는 강섬유 혼입률 2.5%에서 압축강도가 약 23% 증가하였다고 발표하였다.

따라서 강섬유 보강 콘크리트의 압축강도가 골재의 최대치수에 의해 좌우되는 사실을 밝혔다.

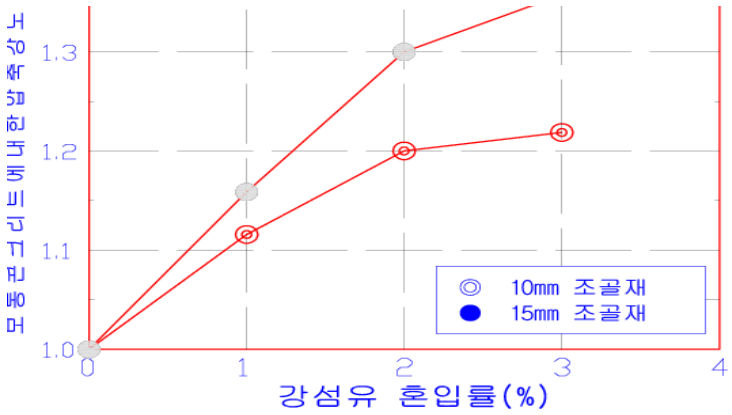
Swamy와 Mangat[12]의 실험에서는 압축강도가 강섬유의 길이와 형상비에 대한 영향이 없으나 강섬유의 직경이 동일한 경우 형상비가 증가함에 따라 압축강도가 증가함을 보였다.

Hannant[13]는 원주형과 입방형의 공시체에 대한 압축강도를 실험하였는데 공시체의 형태에 따라 강도가 다르게 나타났다. 이는 콘크리트를 진동다짐할 때 수평방향으로 배열하려는 강섬유의 성질 때문이라고 밝혔다. 따라서 강섬유보강 콘크리트의 압축강도는 공시체의 형태나 강섬유배열에 따라 변화되는 것을 알 수 있다.

---

12) Swamy, R. N., Mangat, P. S., and Rao, C. V. S. K., The Mechanics of Fiber Reinforcement of Cement Matrices, Fiber Reinforced Concrete, SP-44, ACI, Detroit, pp. 1-28, 1974.

13) Hannant, D. J., The Effects of post Cracking Ductility in the Flexural Strength of Fiber Cement and Fiber Concrete, Fiber-Reinforced Cement and Concrete, RILEM Symposium, Vol. 2, Construction Press, pp. 499-508, 1975.



[그림 2.5] **압축강도와 강섬유 혼입률의 관계**

2.6.2 인장강도

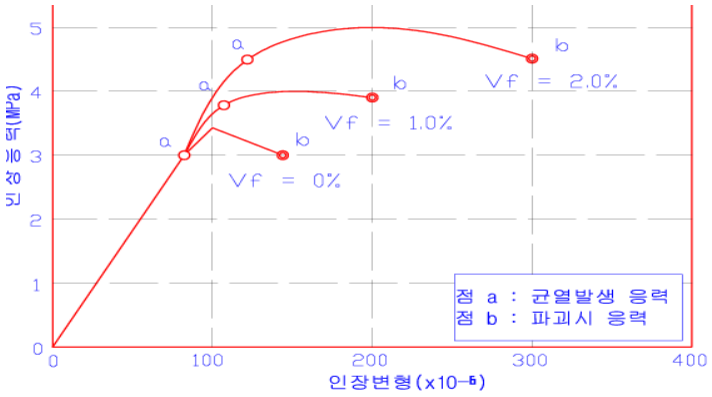
[그림 2.6]은 강섬유보강 콘크리트의 강섬유 혼입률에 따른 인장강도-변형률을 비교한 것으로 강섬유보강 콘크리트는 강도보다는 변형에 대하여 더 우수한 것을 알 수 있다. 초기균열이 생성되는 변위는 보통콘크리트의 약 2배 이상이 될 뿐만 아니라, 그 이후에도 균열을 억제하고 있는 강섬유의 부착력에 의하여 변형에 저항한다.

한편, [그림 2.6]에서 a지점이 강섬유보강 콘크리트의 초기 인장파괴 시점으로 항복점에 해당되는 값이다. 이 값을 강섬유보강 콘크리트의 응력-변형률곡선을 이용하여 초기곡선이 선형에서 비선형으로 변화되는 지점을 구하여 초기균열강도(First Crack Strength)라 하였으나, 강섬유보강 콘크리트의 경우에는 인장재하 초기부터 비탄성 거동을 보이므로 응력-변형률곡선으로 초기균열강도를 구하기는 어렵다.

Johnson과 Coleman은 인장실험을 통해 인장강도의 증가는 강섬유의 혼입률과 형상비에 영향을 받으며, 강섬유 혼입률이 증가하면 인장강도는 거의 선형으로 증가하고, 형상비가 클수록 인장강도의 증가율이 크다고 하였다.

Shah[14]의 실험에서 강섬유의 혼입은 인장강도의 증가보다는 연성증가에 더 큰

영향을 미치는데 최대하중에 도달하여 균열이 발생하여도 강섬유의 부착으로 인해 균열을 억제하여 연성이 증대된다고 밝혔다.



[그림 2.6] **강섬유 보강 콘크리트의 인장응력-변형률 곡선**

2.6.3 휨강도

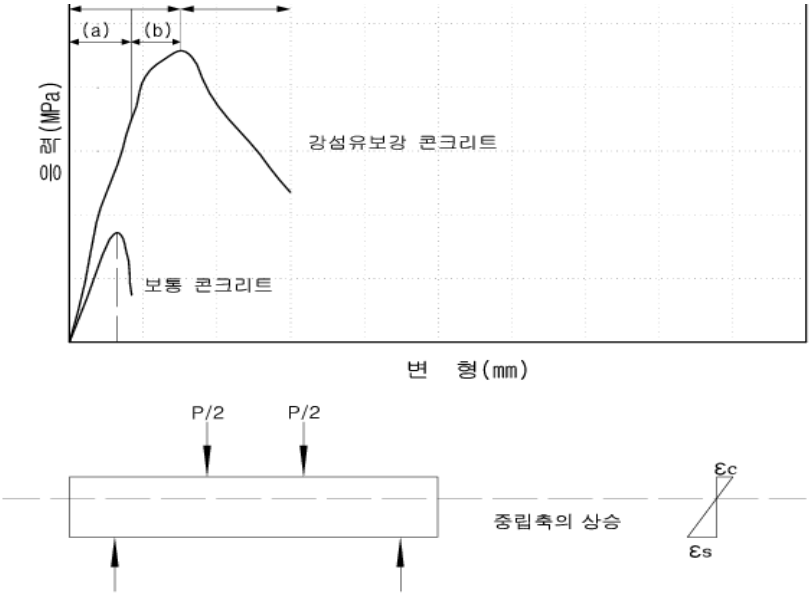
[그림 2.7]은 보통콘크리트와 강섬유보강 콘크리트의 응력-변형률 곡선을 나타낸 것으로, 보통콘크리트의 경우 균열의 발생과 함께 곧 파괴에 이르나 강섬유보강 콘크리트의 경우에는 인장측에서 먼저 균열이 발생 확장하여 a점부터 균열이 발생한다. 그리고 강섬유의 부착강도에 의해 파괴시 응력 b점에 이르는데 균열이 계속 증대되면 중립축이 상승하여 인장변형이 급격히 증대함에 따라 강섬유가 인발되면서 파괴된다.

Swamy와 Mangat의 휨실험 결과에서 강섬유의 형상비는 휨강도에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으며, 강섬유의 혼입률과 직경이 동일하면 휨강도는 강도가 저하될때까지는 형상비와 함께 선형적으로 증가한다.

---

14) Shah. S. P., Editor, Proceedings, National Science Foundation Workshop in High Strength Concrete. University of Illinois at Chicago Circle, pp. 226, 1979.

Shah의 실험에서는 강섬유 혼입률이나 길이의 증가에 따라 일정비율까지는 휨강도가 선형적으로 증대되고, 무근콘크리트(Plain Concrete)와 철근콘크리트에 강섬유를 혼입할 때, 철근콘크리트의 휨강도는 무근콘크리트에 비해 3배이상 크다는 사실이 나타났다. 따라서 무근콘크리트에 강섬유를 보강하는 것보다는 철근콘크리트에 강섬유를 혼합하여 사용하는 것이 휨강도 향상에 더 효율적임을 알 수 있다.



[그림 2.7] **강섬유 보강 콘크리트의 응력-변형 곡선**

2.6.4 전단강도

콘크리트 보부재의 전단저항은 보작용(Beam Action)과 아치작용(Arch Action)으로 거동한다. 보작용은 콘크리트와 철근이 완전히 부착되어 있을 때 부재 단면내의 모멘트의 팔 길이가 일정하고 주인장 철근의 응력이 변하면서 단면내부의 모멘트가 변하는 것을 말한다. 그리고 아치작용은 철근과 콘크리트 사이의 부착응력이 존재하지 않을 때 주인장철근의 응력은 일정하고, 단면내부의 팔 길이가 변하면서 단

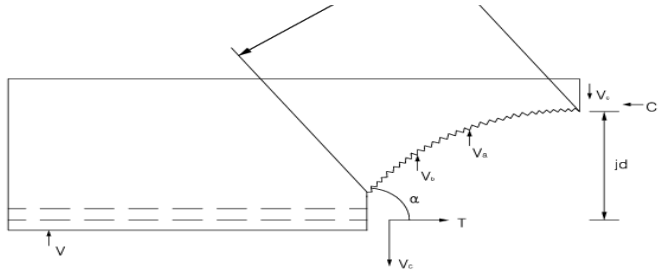
면내부의 모멘트가 변하는 것이다.

그러나, 실제의 보에서는 철근과 콘크리트가 상호작용하여 전단력으로 나타난다. 이러한 작용은 보의 전단거동을 해석함에 있어서 전단경간비에 따른 전단거동을 분석하는데 중요한 요인이 된다.

일반적으로 전단보강이 없는 철근콘크리트보는 전단경간내에서 발생하는 주인장력이 콘크리트의 인장응력을 초과할 때 보의 전단경간 중앙에 경사진 사인장 전단균열(Diagonal Shear Crack)이 발생하며, 이 균열이 진행되면서 갑작스런 파괴에 이른다.

콘크리트에 강섬유를 혼입할 경우 콘크리트가 취성적 성향에서 연성적으로 변화하고, 인장강도와 장부작용(Dowel Action)과 아치작용(Arch Action)이 향상된다.

강섬유보강 콘크리트보의 전단력의 전달은 여러 가지 현상이 복합되어 그 전달과정은 매우 복잡하다. 이러한 보의 거동을 평형방정식으로 나타낼 수 있으며, 그렇게 하기 위해서는 내외부의 작용요인을 파악해야 한다. [그림 2.8]에서와 같이 전단보강이 없는 콘크리트보의 전단력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.



[그림 2.8] **강섬유보강 콘크리트보의 균열후 내력**

$$V_{sn} = V_a + V_b + V_c + V_d \qquad (2\text{-}3)$$

여기에서, V_a : 골재의 장부작용(맞물림 작용)에 의한 마찰력(kN)

V_b : 사인장균열을 따라 발생하는 강섬유의 인발력(kN)

V_c : 균열이 발생하지 않은 콘크리트의 전단력(kN)
V_d :주인장 철근의 수직방향 장부작용에 의한 부착력(kN)
T : 철근의 인장응력(MPa)
C : 콘크리트의 압축응력(MPa)
jd : 인장응력(T)과 압축응력(C) 사이의 거리(㎜)
sinα : 인장응력과 사인장균열의 각도

강섬유보강 콘크리트보의 전단력은 위의 식과 같은 일반적인 철근콘크리트보의 전단력에 강섬유의 인발력을 추가함으로써 매우 복잡한 양상을 나타낸다.

여기서 Narayanan과 Darwish는 안전성을 유지하기 위해 극한전단력을 구하기 위한 식에서 골재의 장부 작용은 무시한다고 가정하였다. 우선 이들은 강섬유의 인발력 V_b를 계산하기 위하여 다음 식과 같은 Romualdi 등에 의해 제안된 강섬유의 수(n_w)를 계산하는 식을 이용하였다.

$$n_w = \frac{1.64\rho_f}{\pi D^2} \qquad (2\text{-}4)$$

여기서, ρ_f: 강섬유혼입률

D: 강섬유의 직경(㎜)

전단균열과 부재가 이루는 각이 α이고, 사균열의 길이가 jd/sinα라고 가정하면 강섬유보강 콘크리트보의 사인장균열 단면에 걸쳐 존재하는 강섬유의 전체 수는 다음과 같다.

$$n = n_w \cdot b \cdot \frac{jd}{\sin\alpha} \qquad (2\text{-}5)$$

여기서, b : 부재 폭(㎜)

사인장균열 단면에 수직한 강섬유의 전체 부착면적은 다음과 같다.

$$A_b = n \cdot \frac{\pi DL}{4} \quad (2\text{-}6)$$

여기서, 인발길이가 0에서 L/2의 범위에 있기 때문에 평균 인발길이로 L/4을 가정한다. 강섬유의 저항이 균열단면에 수직으로 작용한다고 가정하면 전체 강섬유힘 F_b는 다음과 같다.

$$F_b = A_b \cdot \tau \quad (2\text{-}7)$$

여기서, τ : 강섬유의 평균 내부표면 부착응력(MPa)

그러므로, 강섬유의 인발력은 다음과 같다.

$$V_b = F_b \cdot \cos\alpha \text{이므로} \quad (2\text{-}8)$$

$$v_b = \frac{F_b \cdot \cos\alpha}{b \cdot j \cdot d} \quad (2\text{-}9)$$

여기서 α = 45° 라고 가정하면, 인발응력 V_b는 식(2-5), 식(2-6), 식(2-7), 식(2-8)로부터 다음과 같이 주어진다.

$$v_b = 0.41\frac{L}{D} \cdot \rho_f \cdot \tau \quad (2\text{-}10)$$

위 식에서 강섬유의 다른 형태에 의해 인발저항의 변화를 허용하기 위하여 부착계수 d_f를 도입하여 수정하면 다음과 같다.

$$v_b = 0.41 \cdot d_f \cdot L/D \cdot \rho_f \cdot \tau \quad (2\text{-}11)$$

여기서, d_f : 강섬유의 부착계수로서,

(직선형 0.5, 갈고리형 0.75, 톱니형 1.0)

ρ_f : 강섬유 보강비

τ : 강섬유의 평균 내부표면 부착응력(MPa)

강섬유의 부착력에 대한 여러 연구에서 실험결과가 큰 차이를 나타내므로 극한 부착응력 Γ는 Swamy, Mangat, Rao에 의해 제안된 4.15MPa을 사용하였다.

전단보강된 강섬유보강 철근콘크리트보의 전단전달은 앞에서 설명한 전단보강이 없는 보의 전단력과 전단보강근이 부담하는 부분의 합으로 생각할 수 있는데, 즉 전단보강근을 보강한 보의 전단력은 다음과 같다.

$$V_n = V_{sn} + V_{st} \qquad (2\text{-}12)$$

여기서, V_n : 보부재의 공칭전단력(kN)
V_{sn} : 전단보강이 없는 보부재의 전단력(kN)
V_{st} : 전단보강근에 의한 전단력(kN)

2.6.5 탄성계수

Williamson의 실험에 의하면, 강섬유보강 콘크리트의 휨 탄성계수는 강섬유의 혼입률에 따라 거의 변화가 없거나 약간 감소하였다. Patton, Whittaker등은 강섬유 혼입률이 1% 증가하면 강섬유 보강 콘크리트의 휨 탄성계수는 3.3%씩 감소한다고 발표하였다. 이와 같은 결과로 휨 탄성계수에 대한 강섬유 혼입의 효과는 일정하지 않으며, 압축시험에서 얻은 휨 탄성계수는 복합재료의 혼합법칙을 잘 따르지 않고 있음을 알 수 있다. 또한, 압축 휨 탄성계수는 강섬유 혼입률 2~3% 정도에서 동일 물시멘트비인 보통콘크리트와 큰 차이가 없고, 인장탄성계수는 강섬유 혼입률의 증가와 형상비가 커짐에 따라 증가하였다.

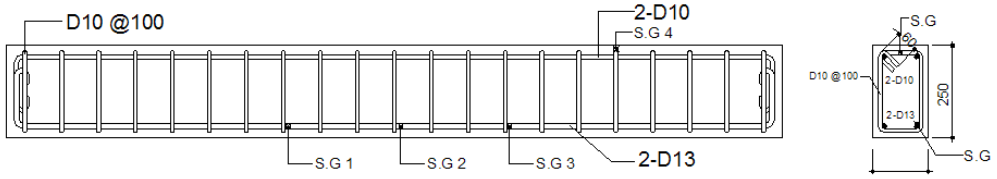
Ⅲ. 실험계획

3.1 실험 개요

본 연구에서는 폐콘크리트를 혼입량에 따라 원주형 공시체(Ø100㎜×200㎜)를 제작하여, 재령에 따라 압축강도 실험, 인장강도 실험, 내화도(耐火度) 실험 등의 재료실험과 철근콘크리트 보의 휨 실험에 대하여 실험한다.

실험은 크게 재료실험과 예비실험 그리고 본 실험으로 구분하여 실험하며, 재료실험은 본 실험에 사용될 재료인 콘크리트, 철근 등의 재료적인 물성을 시험하기 위하여 1,000kN의 U.T.M을 이용하여, KS규격에 의하여 실시한다.

부재 시험체는 강도설계법(Ultimate Strength Design method, USD)으로 설계하며, 시험체의 크기는 [그림 3.1]과 같이 150㎜(b)×250㎜(h)×2,100㎜(L)로 제작한다.



[그림 3.1] 휨 시험체의 배근 상세도

[그림 3.1]과 같이 휨 시험체의 철근배근은 SD300을 사용하여, 상부에 2-D10, 하부에 2-D13을 배근하고, 스터럽은 D10@100을 배근하며, 피복두께는 원래 보나 기둥은 40㎜이상이나 시험체이므로 30㎜로 한다.

철근은 철근조립 전에 스트레인게이지(Strain Gauge. 이하 S.G)를 부착하여 조립하고, 콘크리트 부어넣기는 거푸집에 조립된 철근을 넣은 후 피복두께 유지를 위해 스페이서(Spacer)를 설치한 후 부어넣기를 한다. 부어넣기 후 콘크리트의 습윤상태를 유지하기 위해 비닐을 덮어 보온양생 한다.

28일 이상 양생 후 실험실로 운반하여 몰드(mold)를 떼어내기 후 이물질을 제거한다. 시험체 표면에는 백색 수성페인트를 칠하여 10㎝간격으로 격자(grid)를 그려서 실험 시 발생되는 균열의 위치 및 형태, 진행상황의 파악이 용이하도록 한다.

3.2 실험 기기

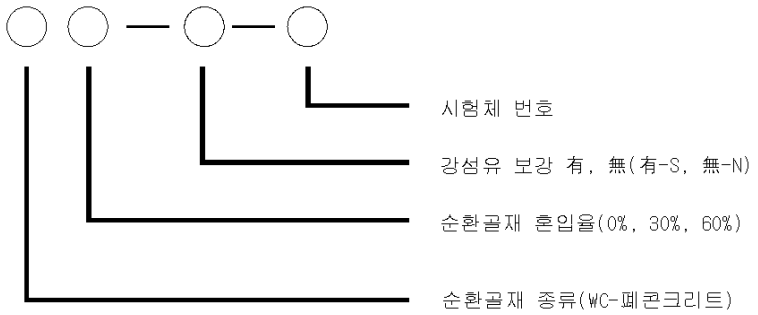
본 실험에 사용될 측정기구는 만능구조실험기(Universal Testing Machine, U.T.M)가 설치된 실험실에서 행하며, 시험체로 완전 파괴 될 때까지 가력하여 최대 휨 내력을 시험체의 최대 휨 내력으로 결정한다.

본 실험에 사용된 실험기구는 다음과 같다.

- 만능구조시험기(U.T.M) : Shimadzu Co., 최대하중 1MN, 최대유효높이 3m, 테이블길이 4.2m
- Dateletty 402(Shimadzu ; Japan)
- Datelogger(TDS-601 ; Tokyo Sokki ; Japan)
- Displacement Transducer (100mm D.T, 300mm D.T)
- Load Cell (1MN)
- Hand Grinder
- Sand Paper
- 내화도 실험기

3.3 실험 변수

본 실험에서 고려되는 변수는 보통 굵은골재에 대한 순환골재의 혼입량에 따라 원주형 공시체와 보 시험체를 제작하여, 실험변수별로 순환골재를 사용한 콘크리트의 구조적 특성에 중점을 두며 원주형 공시체명과 보 시험체명에 따른 실험 변수별 구분은 다음과 같다.



<표 *3.1*> 실험계획 및 변수

실 험 요 인		수 준
배합사항	순환골재	폐콘크리트(0%, 30%, 60)
	W/C	45%
	섬유	강섬유(시멘트량의 1%)
	혼화제	고성능감수제(시멘트량의 1%)
	슬럼프	15±2cm
시험체	공시체	원주형 공시체
	부재시험체	철근콘크리트 휨 시험체

3.4 사용 재료

3.4.1 시멘트

시험체 제작에 사용된 시멘트는 KS L 5201(포틀랜드 시멘트, 2006.10)에 규정된 S사 제품을 사용하고, 시멘트의 화학적 성분 및 물리적 성질은 <표 3.2>와 같다.

<표 3.2> 시멘트의 화학적 성분 및 물리적 성질

화 학 성 분 (%)							비 중
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Ig. loss[15]	
21.9	6.59	2.81	60.12	3.32	2.11	2.58	3.15

3.4.2 골재

잔골재와 굵은골재는 KS F 2502(골재의 체가름 실험 방법, 2005.12)의 규격에 적합한 골재를 사용하며, 잔골재는 섬진강産 강모래를 굵은골재는 깬자갈을 사용한다. 골재의 물리적 성질은 <표 3.3>과 같다.

<표 3.3> 골재의 물리적 성질

골재 종류	최대치수 (mm)	단위용적질량 (t/㎥)	비 중	흡수율 (%)	조립율[16] (*F.M*)
잔골재	5	1.65	2.61	1.05	2.69
굵은골재	20	1.55	2.67	1.24	6.83

3.4.3 순환골재

순환골재로써 폐콘크리트는 C사에서 임팩트 크러셔(Impact crusher)에 의해 파쇄되고 에어 분류기 및 습식분급기에 의해 불순물과 부착된 미분말이 제거된 I종 순환굵은골재를

15) Ig. loss(강열감량, 强熱減量, loss of ignition) : 시멘트나 석회 등을 고온에서 가열할 때에 잃는 수분, 결정수, 탄산가스, 휘발성 물질 등의 퍼센트

16) 조립율(fineness modulus;FM) : 골재의 입도를 표시하는 계수로서 10개의 표준체를 이용해서 체가름 시험을 했을때 각 체에 남는량의 누가중량 백분율의 합을 100으로 나눈 값.

사용한다. 본 연구에 사용된 폐콘크리트의 물리적 성질은 <표 3.4>와 같다.

<표 *3.4*> 폐콘크리트의 물리적 성질

최대직경 (㎜)	비 중	흡수율 (%)	조립율	단위용적질량 (t/㎥)
20	2.61	2.63	6.64	1.52

<사진 *3.1*> 순환골재 전경

3.4.4 강섬유

시험체에 사용된 K사의 강섬유를 사용하였으며 강섬유의 물리적 특성은 <표 3.5>와 같다.

<표 *3.5*> 강섬유의 물리적 특성

비 중	파괴시변형률 (%)	극한변형률 (%)	인장강도 (MPa)	휨탄성계수 (MPa)
7.86	~0.3	0.5~3.5	$0.77 \sim 2.1 \times 10^3$	2.1×10^5

<사진 *3.2*> 강섬유 전경

3.4.5 철근

실험에 사용된 부재 시험체의 철근은 D10(SD300), D13(SD300)으로 KS B 0801(금속재료 인장시험편, 2007.11)과 KS B 0802(금속재료의 인장시험방법, 2003.10)에 따른 인장시험편을 제작하여 인장시험을 실시한다. 각 철근의 인장시험결과는 <표 3.6>과 같다.

<표 *3.6*> 철근의 재료특성

종 류	단면적 (mm^2)	항복강도 (MPa)	극한강도 (MPa)	연신율 (%)	판정
D10	71	380	533	28.17	합격
D13	127	387	551	28.61	합격

3.4.6 AE 감수제

본 연구에 사용한 혼화제는 AE 감수제 일종인 N사의 제품을 사용한다. AE 감수제의 물리적 특성은 <표 3.7>과 같다.

<표 *3.7*> *AE* 감수제의 물리적 특성

유형	주성분	비중	알카리성 (%)	염소이온량 (kg/m^3)	색 상
액 상	폴리카루본산계 (polycarboxylate)	1.04±0.2	0.1	0.01이하	암갈색

3.5 콘크리트의 배합

시험체에 사용된 콘크리트는 설계기준강도(f_{ck}) 24MPa이며, 콘크리트의 배합순서는 잔골재, 시멘트, 굵은골재와 같은 순서로 투입하여 1분간 건비빔을 한 후, 물을 투입하여 믹서에서 3분 비빔을 한 다음 믹서(mixer)에서 배출된 콘크리트를 바닥에서 다시 한번 비빔을 한 후 KS F 2402(포틀랜드시멘트 콘크리트의 슬럼프 시험방법, 2007.10)의 규격에 의하여 슬럼프를 확인한 후 부어 넣기 하고, 동시에 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험방법, 2005.12)의 규격에 따라 원주형 시험체를 제작하여 재령별 압축강도를 측정하며 콘크리트 배합표는 <표 3.8>과 같다.

<표 *3.8*> 콘크리트 배합표

시험체 종류	물시멘트비[3] (%)	중 량 배 합(kg/m³)						비 고
		시멘트	잔골재	굵은 골재	순환 골재	*AE* 감수제	섬유	
RCA-N	45	365	743	***975***	***0***	3.65	0	
RCA-S	45	365	743	***975***	***0***	3.65	3.65	
RCA-30	45	365	743	***683***	***284***	3.65	0	
RCA-30	45	365	743	***683***	***284***	3.65	3.65	
RCA-60	45	365	743	***390***	***568***	3.65	0	
RCA-60	45	365	743	***390***	***568***	3.65	3.65	

17) 물시멘트비(Water Cement ratio, W/C) : 콘크리트를 반죽할 때의 시멘트량 C와 수량 W의 중량비를 말하며 보통은 백분율로 나타낸다.

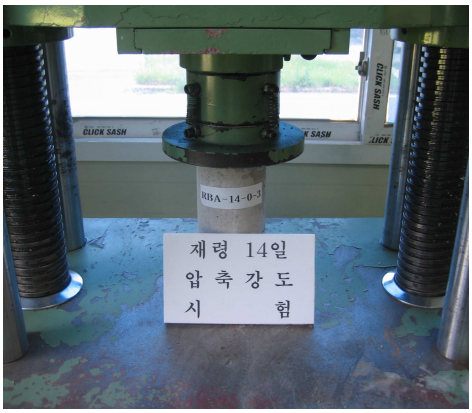
3.6 실험 방법

본 실험에 사용할 실험기기는 만능구조실험기 및 내화도 시험기 등 이 사용된다.

3.6.1 콘크리트의 압축강도 실험

공시체는 실험하는 날까지 자연 그대로의 양생 상태를 유지시키며, 표면을 연마한 후 0.05mm 정밀도를 갖는 버어니아캘리퍼스(Vernier Calipers)로 지름과 길이를 2회씩 측정한 후 평균값으로 단면적을 구한다.

압축강도 실험은 최대하중 1,000kN, 최대높이 3m, 테이블 길이 4.2m의 만능구조실험기에 가압판(加壓板)과 구좌(球座, Sperical Block)를 사용하여 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험 방법, 2005.12)에 따라 실험한다.



[사진 3.3] 콘크리트 압축강도 실험 전경

3.6.2 콘크리트의 인장강도 실험

공시체는 실험하는 날까지 자연 그대로의 양생 상태를 유지시키며, 표면을 연마한 후 0.05mm 정밀도를 갖는 버니어캘리퍼스로 지름과 길이를 2회씩 측정한 후 평균값으로 단면적을 구한다.

인장강도 실험은 만능구조시험기에 가압판과 구좌를 사용하여 KS F 2423(콘크리트의 인장강도 시험 방법, 2006.10)에 따라 실험한다.

[사진 3.4] **콘크리트 인장강도 실험 전경**

3.6.3 콘크리트 내화도(耐火度) 실험

콘크리트 구조물에 고온의 열을 받으면 온도에 따라 여러 형태의 현상이 일어나며, 특히 조기재령의 고강도 콘크리트는 폭열(爆裂)하는 것으로 알려져 있다.

골재의 공극율(空隙率)이 적은 경우는 고열에 대하여 비교적 안정하나 공극율이 큰 골재는 팽창하며 특히 화강암, 사암 등 석영질을 포함한 골재는 온도가 약 575℃이상이 되면 갑자기 체적이 1.085배 정도 팽창하여 때때로 골재의 쪼갬과 박락(剝落)을 발생시킨다.

화재에 의한 콘크리트 구조물의 손상으로서 가장 많은 것은 콘크리트의 탈락이며, 탈락에 대한 원인은 크게 3가지로 나누어 볼 수 있다.

첫째 : 골재의 물리·화학적 변화

둘째 : 공극(空隙) 중의 수분 증발에 의한 인장 강도

셋째 : 콘크리트 내부와 표면의 온도차 또는 철근과 콘크리트의 변형률 차이에 의한 하중 등에 따라 철근이 노출되어 항복되기 쉬운 상태에 이르고, 철근에 의한 빠른 열전도로 구조단면에 결손이 발생하게 된다.

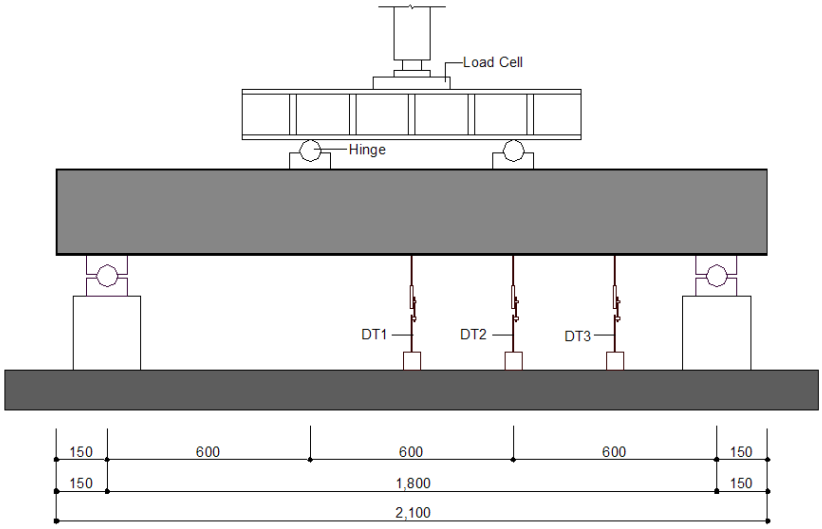
본 실험에서는 부순 적벽돌과 폐콘크리트 혼입량에 따라 제작한 시험체를 양생한 다음 내화도 시험기를 사용하여 200℃, 400℃, 600℃, 800℃의 온도로 KS F 2257-1 (건축부재의 내화시험방법-일반요구사항, 2005.7)의 방법에 의해 실험을 실시 후에 압축강도 실험을 한다.

(a) 내화도 실험 전경 (b) 내화도 실험 후 압축강도 실험 전경

[사진 3.5] **콘크리트 내화도 실험 전경**

3.6.4 휨 실험

휨 실험은 [그림 3.2]와 같이 만능구조실험기가 설치된 실험실에서 행하며, 단순지지상태로 휨 시험체를 설치하고 2점의 집중하중을 작용하여 휨 시험체가 완전 휨 파괴 될 때까지 가력 후 극한 휨내력을 결정한다.



[그림 3.2] **휨 시험체의 *Set-up***

(a) 파괴 전

(b) 파괴 후

[사진 3.6] **휨 시험체의 파괴 전·후 전경**

균열의 진행상황은 하중을 가력 하면서 하중단계에 따라 발생되는 균열을 유성펜을 사용하여 위치와 하중을 표시하면서 파악한다.

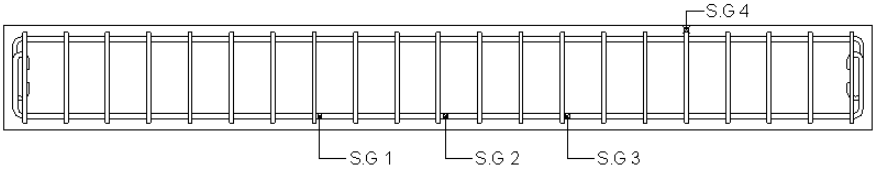
가력은 초기에는 1kN 단위로 하중제어 방식으로 가력하며, 항복 이후에는 변위 2㎜마다 데이터(data)를 측정하는 변위제어방식으로 재하한다. 가력판 상부에 Load Cell을 설치하여 가력단계에 따른 하중을 측정한다.

시험체 하부의 단부에는 로울러(Roller)를 설치하여 수평변위와 회전에 대한 구속이 발생하지 않도록 하고, 지점파괴를 방지하기 위하여 120mm폭의 각형 철강을 설치하여 실험한다.

우측 가력점 하부 1개소, 중앙부 1개소 그리고 우측지점으로부터 300mm 떨어진 지점 1개소에 LVDT(Linear Vertical Displacement Transducer, 변형게이지. 이하 D T)를 설치하여 가력단계에 따른 시험체의 변위를 측정한다.

철근의 변형은 SG(Strain Gage)를 [그림 3.3]과 같이 철근에 부착하여 변위 측정과 동일한 하중단계에 따라 측정한다.

모든 측정기기의 측정데이터는 Data Logger에 연결하여 수집하며, 개인용 컴퓨터를 이용하여 변환 처리한다.



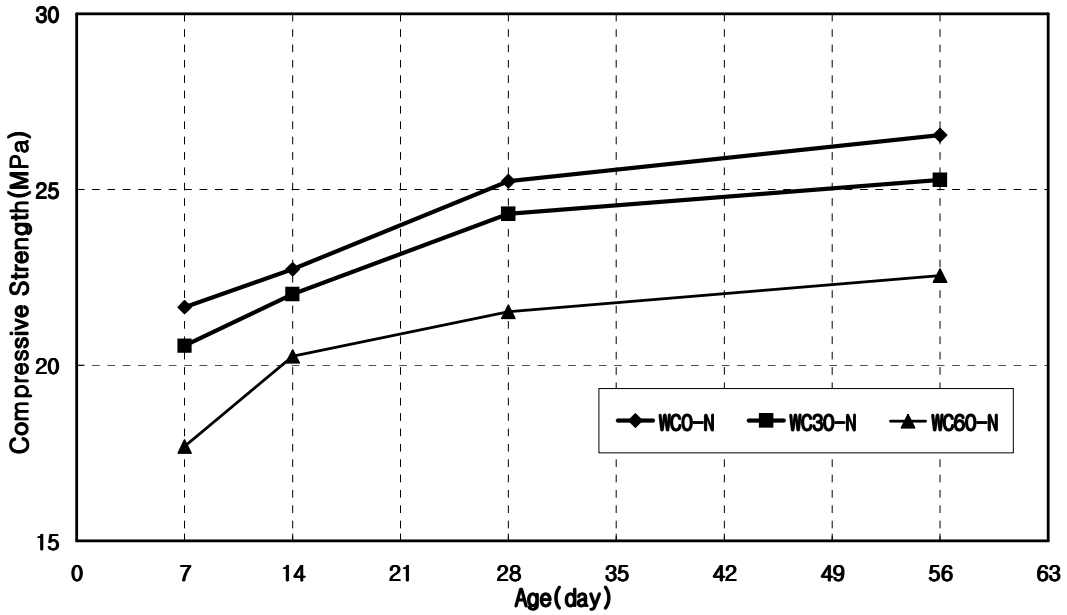
[그림 3.3] **휨 시험체의 스트레인 게이지 부착위치**

Ⅳ. 재료 실험결과

4.1 콘크리트 압축강도 실험결과

<표 *4.1*> 강섬유 무 보강한 순환골재콘크리트의 재령에 따른 압축강도

시험체명	대체 골재 함수율	순환골재 혼입율 (%)	압축강도(MPa)				비 고
			7일	14일	28일	60일	
WC0-N	내부 포수 표면 건조	0	21.7	22.7	25.2	26.6	
WC30-N		30	20.6	22.0	24.3	25.3	
WC60-N		60	17.7	20.3	21.5	22.6	



[그림 4.1] 강섬유 무 보강한 순환골재콘크리트의 재령에 따른 압축강도

순환골재를 혼입한 콘크리트 혼입량과 재령에 따른 원주형 공시체 압축강도 실험결과 는 <표 4.1> 및 [그림 4.1]과 같다.

재령 7일에서 압축강도 실험에서, 순환골재를 혼입율 0% 시험체가 21.7MPa, 혼입율 30%는 기준 시험체보다 22.0MPa, 혼입율 60%는 20.3MPa로 높게 나타났다.

기준 시험체와 순환골재를 혼입 시험체와 비교했을 경우, 기준 시험체가 혼입율 30% 보다 5.08% 정도 높은 1.1MPa로, 혼입율 60% 시험체보다 18.3%정도 높게 나타났다.

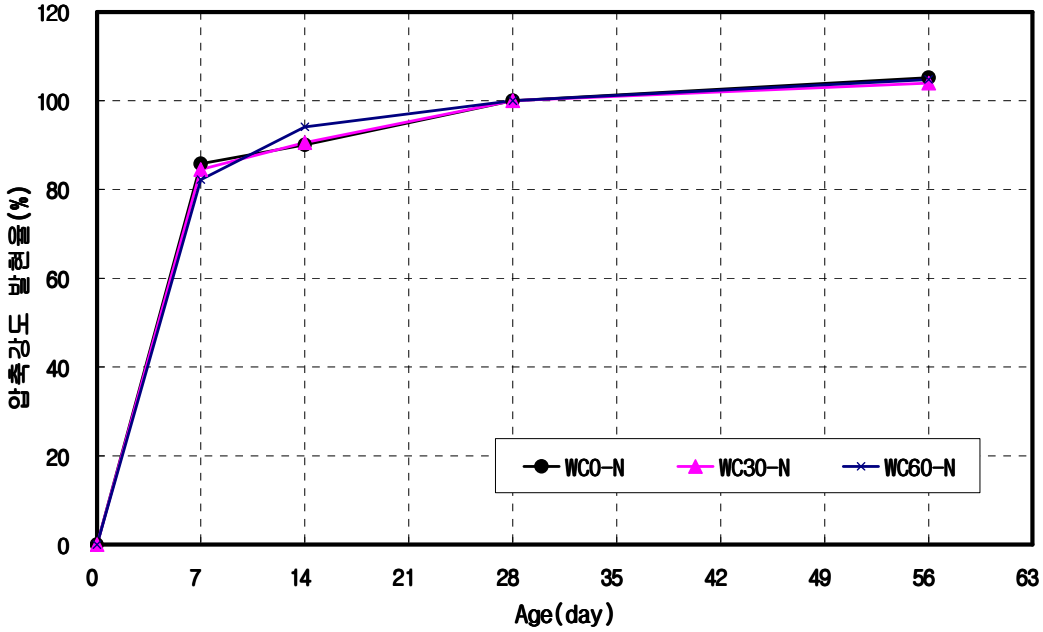
재령 14일의 압축강도 실험에서는, 기준 시험체가 22.7MPa, 혼입율 30% 시험체가 22.0MPa, 혼입율 60% 시험체가 20.3MPa로 나타났으며, 기준 시험체는 혼입율 30%시험체보다 3.12% 정도 높은 0.7MPa, 혼입율 60% 시험체보다 10.9%정도 높은 2.5MPa로 나타났다.

재령 28일의 압축강도 실험에서는, 기준 시험체가 25.2MPa, 혼입율 30% 시험체가 24.3MPa, 혼입율 60% 시험체가 21.5MPa로 나타났으며, 기준시험체와 혼입율 30% 시험체가 설계기준강도 24MPa 이상의 압축강도를 나타냈다. 기준 시험체는 혼입율 30%시험체보다 3.68% 정도 높은 0.9MPa, 혼입율 60% 시험체보다 14.7%정도 높은 2.8MPa로 나타났다.

재령 56의 압축강도 실험에서는, 기준 시험체가 26.6MPa 혼입율 30% 시험체가 25.3MPa 혼입율 60% 시험체가 22.6MPa 나타났으며, 기준 시험체는 혼입율 30% 시험체보다 4.82% 정도 높은 1.3MPa 혼입율 60% 시험체보다 15.1%정도 높은 4.0MPa로 나타났다.

<표 *4.2*> 순환골재를 사용한 콘크리트의 재령에 따른 압축강도 발현율

시험체명	대체 골재 함수율	순환골재 혼입율 (%)	압축강도 발현율(%)				비 고
			7일	14일	28일	60일	
WC0-N	내부 포수 표면 건조	0	86	90	100	105	
WC30-N		30	85	91	100	104	
WC60-N		60	82	94	100	105	



[그림 4.2] 순환골재를 사용한 콘크리트의 재령에 따른 압축강도 발현율

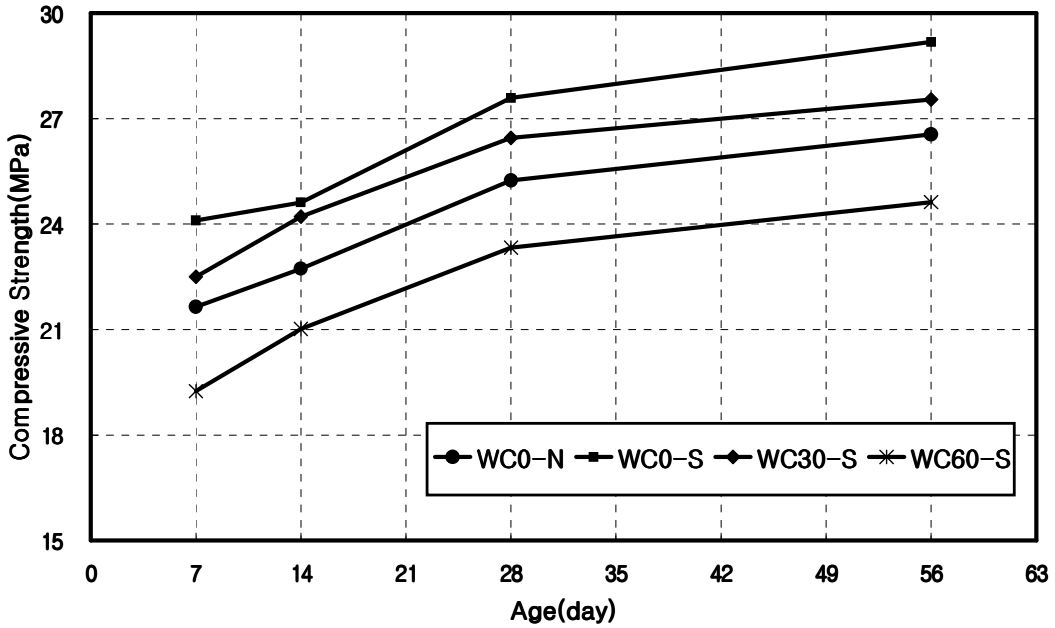
순환골재를 혼입한 콘크리트 혼입량과 재령에 따른 원주형 공시체 압축강도 발현율은 <표 4.2> 및 [그림 4.2]와 같다.

순환골재 혼입한 콘크리트의 혼입량과 재령에 따른 압축강도 발현율은 모든 시험체가 재령 28일 기준으로 재령 7일에 82~86%의 가장 높은 압축강도 발현을 나타냈으며, 재령 28일 이후에도 기준 시험체와 혼입율 60% 시험체는 5%, 혼입율 30% 시험체는 4% 정도 강도 발현을 보였다.

혼입율 30%는 재령 7일부터 재령 28일 강도영역까지 보통 콘크리트와 유사한 수준의 강도발현을 나타냈으며 재령 56일에서는 기준 시험체와 혼입율 30%와 혼입율 60% 시험체가 비슷한 강도발현을 보였다.

<표 4.3> 강섬유 보강 순환골재 콘크리트의 재령에 따른 압축강도

시험체명	대체 골재 함수율	순환골재 혼입율 (%)	압축강도(MPa)				비 고
			7일	14일	28일	60일	
WC0-S	내부 포수 표면 건조	0	24.1	24.6	27.6	29.2	
WC30-S		30	22.5	23.8	26.5	27.5	
WC60-S		60	19.3	21.7	23.3	24.6	



[그림 4.3] 강섬유 보강 순환골재 콘크리트의 재령에 따른 압축강도

강섬유보강 순환골재 콘크리트의 혼입량과 재령에 따른 원주형 공시체 압축강도 실험 결과는 <표 4.3> 및 [그림 4.3]과 같다.

재령 7일에서 압축강도 실험에서, 기준 시험체가 24.1MPa, 혼입율 30%는 기준 시험체보다 22.5MPa, 혼입율 60%는 19.3MPa로 높게 나타났다. 기준 시험체와 순환골재를 혼입 시험체와 비교했을 경우, 기준 시험체가 혼입율 30% 보다 6.63% 정도 높은 1.6MPa로, 혼입율 60% 시험체보다 20.14%정도 높게 나타났다.

재령 14일에서는, 기준 시험체가 24.6MPa, 혼입율 30% 시험체가 24.2MPa, 혼입

율 60% 시험체가 21.0MPa로 나타났으며, 기준 시험체는 혼입율 30%시험체보다 1.65% 정도 높은 0.4MPa, 혼입율 60% 시험체보다 14.6%정도 높은 3.6MPa로 나타났다.

재령 28일의 압축강도 실험에서는, 기준 시험체가 27.6MPa, 혼입율 30% 시험체가 26.5MPa, 혼입율 60% 시험체가 23.3MPa로 나타났으며, 기준 시험체는 혼입율 30%시험체보다 4.13% 정도 높은 1.1MPa, 혼입율 60% 시험체보다 15.4%정도 높은 4.3MPa로 나타났다.

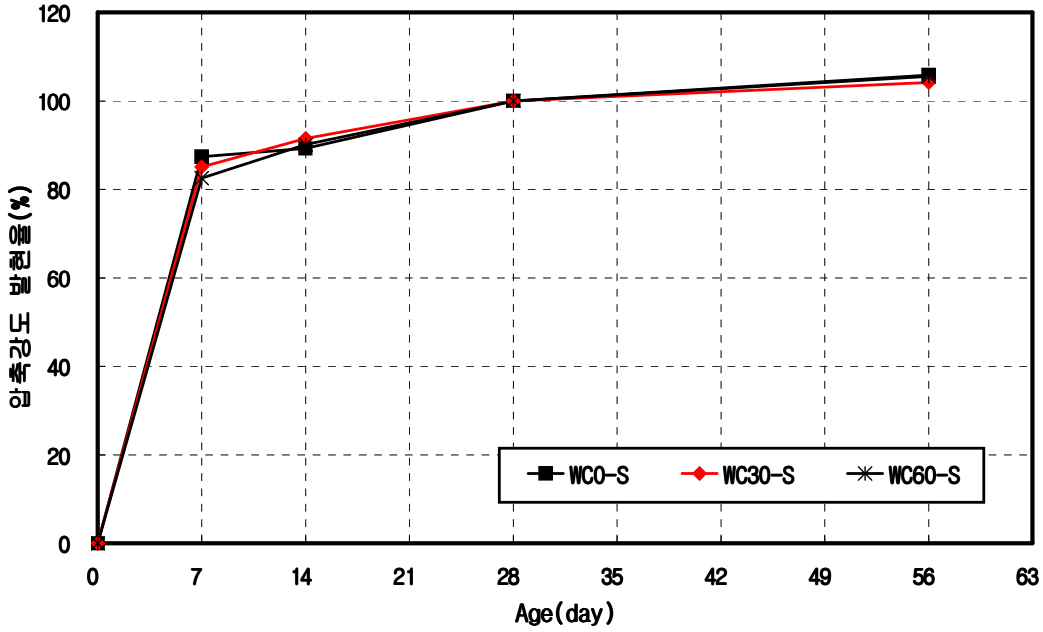
재령 56의 압축강도 실험에서는, 기준 시험체가 26.6MPa, 혼입율 30% 시험체가 25.3MPa 혼입율 60% 시험체가 22.6MPa로 나타났다. 재령 56일에서 기준시험체, 혼입율 30%시험체, 60%시험체 모두 설계기준강도 24MPa 이상의 압축강도를 나타냈다. 기준 시험체는 혼입율 30%시험체보다 5.6% 정도 높은 1.6MPa, 혼입율 60% 시험체보다 15.6%정도 높은 4.6MPa로 나타났다.

강섬유보강 순환골재 콘크리트 공시체의 혼입량과 재령에 따른 압축강도 발현율은 <표 4.4> 및 [그림 4.4]와 같다. 보통콘크리트와 강섬유보강 순환골재 콘크리트는 재령 28일 기준으로 재령 7일에 83~87%의 가장 높은 압축강도 발현을 보였다.

재령 28일 이후에도 기준 시험체와 혼입율 60% 시험체 6%, 혼입율 30% 시험체는 4% 정도 강도 발현을 보였다.

<표 *4.4*> 강섬유 보강 순환골재 콘크리트의 재령에 따른 압축강도 발현율

시험체명	대체 골재 함수율	순환골재 혼입율 (%)	압축강도 발현율(%)				비 고
			7일	14일	28일	60일	
WC0-S	내부 포수 표면 건조	0	87	89	100	106	
WC30-S		30	85	92	100	104	
WC60-S		60	83	90	100	106	



[그림 4.4] 강섬유 보강 순환골재 콘크리트의 재령에 따른 압축강도 발현율

혼입율 30%는 재령 7일부터 재령 28일 강도영역까지 보통 콘크리트와 유사한 수준의 강도발현을 나타냈으며 재령 56일에서는 기준 시험체와 혼입율 60% 시험체가 비슷한 강도발현을 보였다.

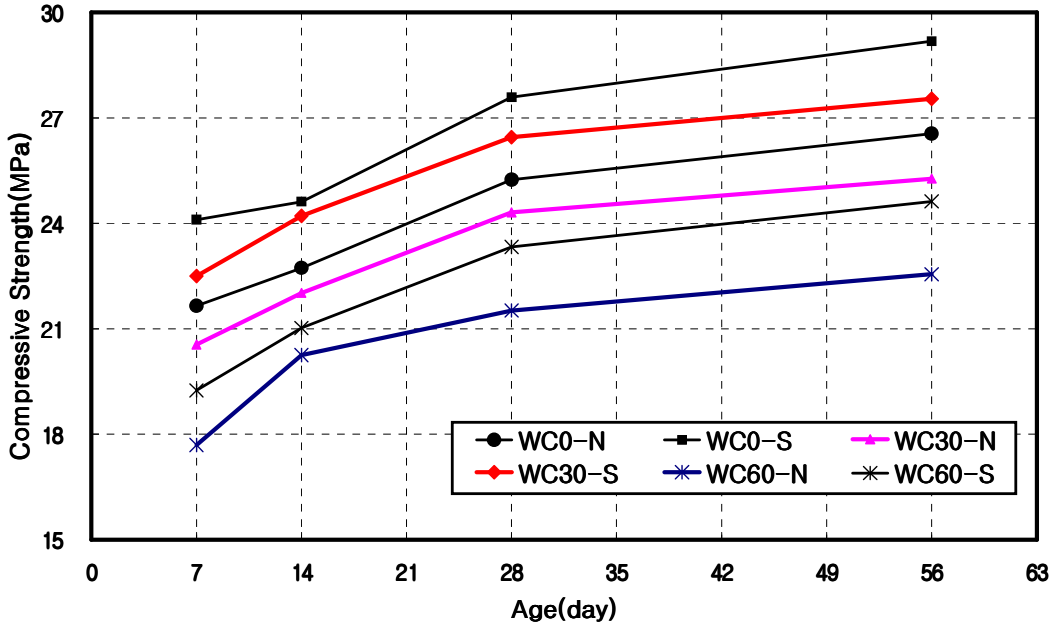
순환골재와 강섬유보강 순환골재 콘크리트의 압축강도 실험결과, 압축강도만으로 적용성을 보았을 때, 강섬유보강한 순환골재를 혼입량 30%까지는 실제 구조물에 적용이 가능할 것으로 사료된다.

압축강도 실험 결과, 강섬유를 무보강한 순환골재 시험체의 경우, 기준시험체에 비해 순환골재 30% 시험체는 94.9~96.9%정도, 순환골재 60% 시험체는 81.7~89.1% 정도 낮은 압축강도를 보였다.

또한 기준시험체와 혼입율 30% 시험체가 재령 28일에 설계기준강도 24MPa 이상의 강도발현을 보였다. 혼입율 60% 시험체가 설계기준강도의 89.7%인 21.5MPa로 설계기준강도 보다 10.3% 정도 강도 저하가 있었다.

강섬유 보강한 순환골재 시험체의 경우, 기준시험체와 혼입율 30% 시험체가 재

령 28일에 설계기준강도 24MPa 이상의 강도발현을 보였으며, 혼입율 60% 시험체가 설계기준강도의 97.2%인 23.3MPa의 강도 발현을 보였다.

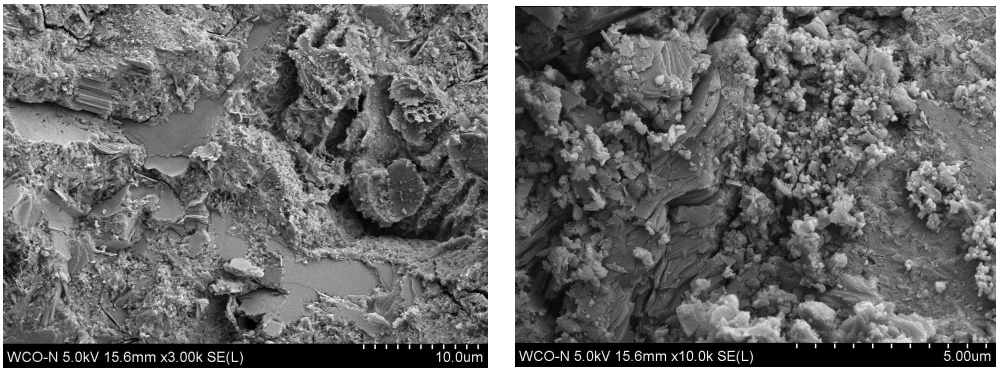


[그림 4.5] 강섬유 보강 유무에 따른 순환골재 콘크리트의 재령별 압축강도

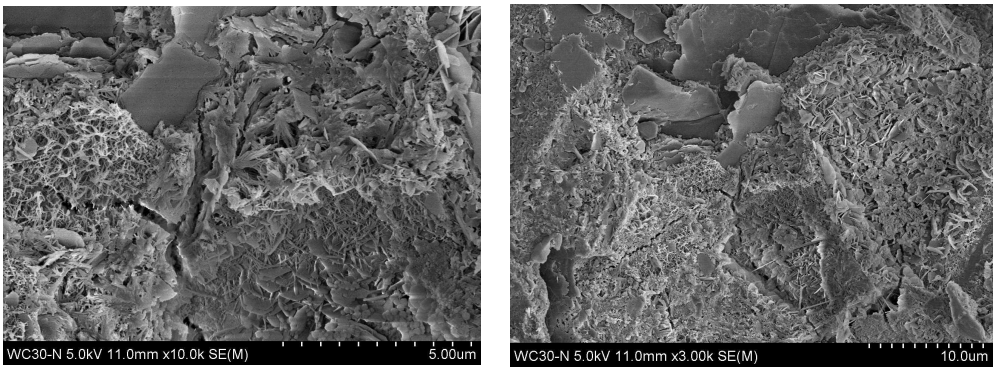
기준시험체와 순환골재 혼입량에 따른 시험체를 비교했을 경우, 기준시험체에 비해 순환골재 혼입율 30% 시험체는 93.4~98.3%정도, 순환골재 60% 시험체는 79.9~85.4%정도 재령별로 압축강도를 갖는 것으로 나타났다.

이는 순환골재의 표면에 붙어있는 미립분과 순환골재의 생산방식에 따른 골재내부의 공극특성 등으로 순환골재 혼입량이 증가할수록 압축강도는 저하하는 것으로 사료된다.

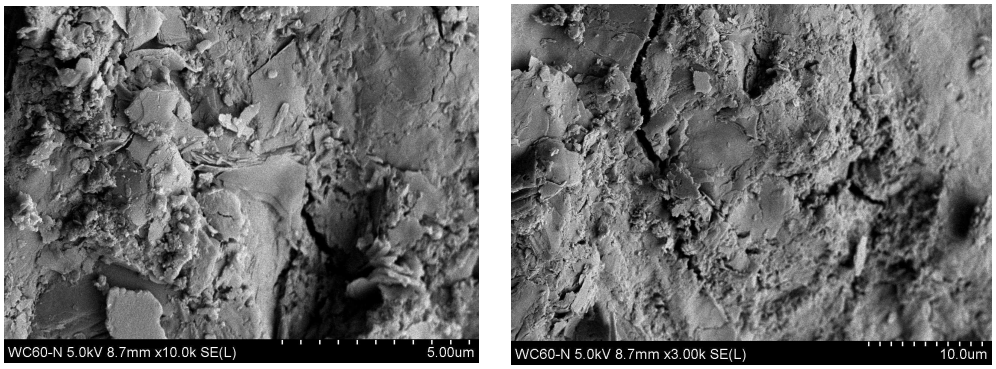
강섬유 혼입 유무에 따라 비교했을 경우, WC0-S 시험체는 WC0-N 시험체에 비해 8.3~11.3% 정도, WC30-S 시험체는 WC30-N 시험체에 비해 8.8~9.9% 정도, WC60-S 시험체는 WC60-N 시험체에 비해 3.8~9.2%정도 높게 나와 순환골재 콘크리트에 강섬유를 보강함으로써 압축강도의 증진효과는 있는 것으로 사료된다.



(a) WC0-N

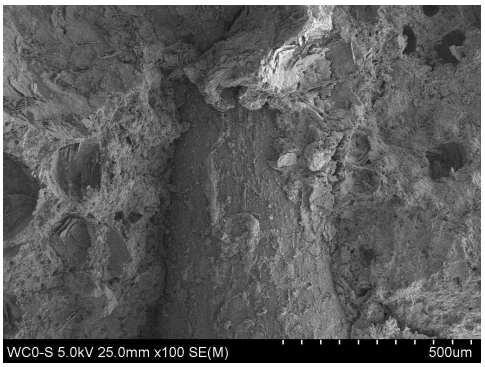


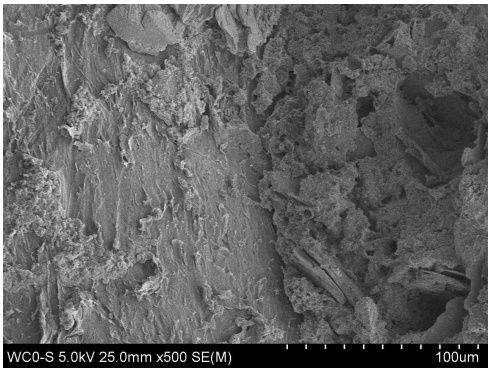
(b) WC30-N



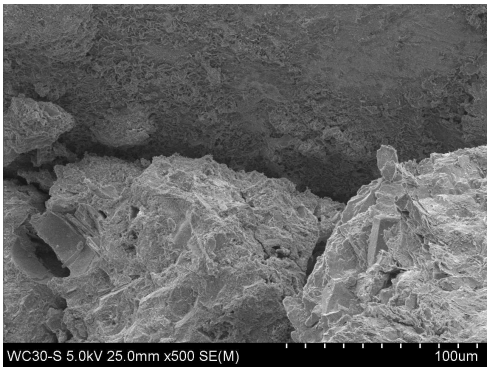
(c) WC60-N

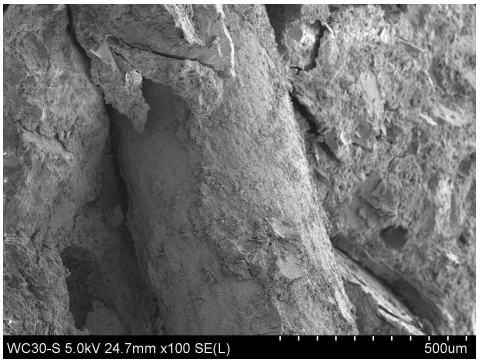
[사진 4.1] 강섬유 무보강 순환골재 콘크리트의 전자현미경 촬영



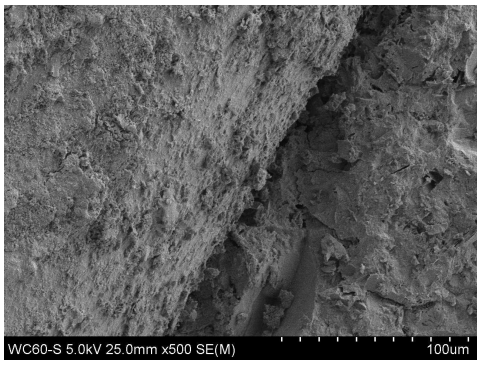


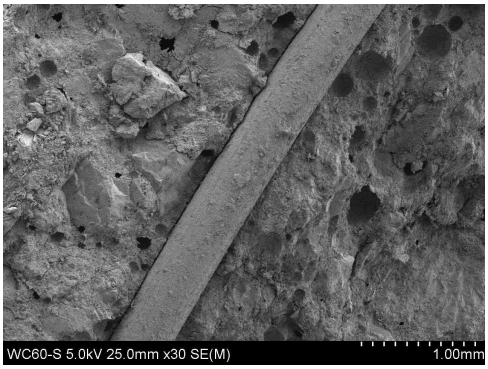
(a) WC0-S





(b) WC30-S





(c) WC60-S

[사진 4.2] 강섬유 보강 순환골재 콘크리트의 전자현미경 촬영

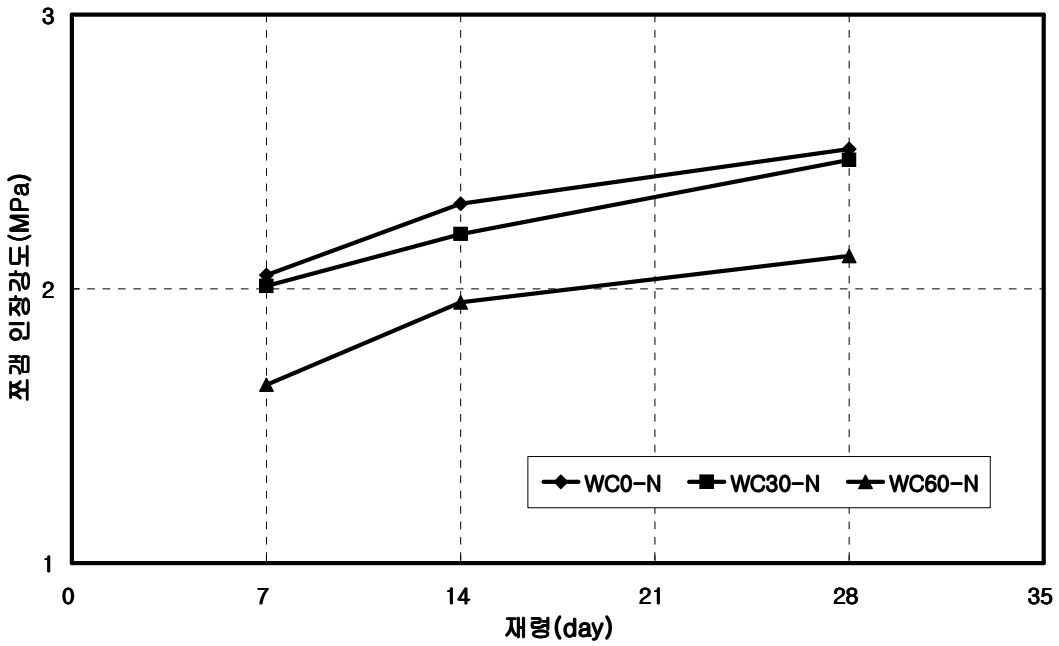
4.2 콘크리트 쪼갬 인장강도 실험결과

<표 4.5> 및 [그림 4.6]은 순환골재를 사용한 콘크리트의 혼입량에 따른 원주형 공시체의 쪼갬 인장강도 실험 결과를 나타낸 것으로 재령 7일에서의 보통 콘크리트 및 순환골재 혼입 30% 및 60% 시험체는 각각 2.05, 2.01 및 1.65MPa로, 재령 14일에서는 2.3, 2.2 및 2.0MPa로 초기재령에서는 보통콘크리트 ≥ 혼입 30% 시험체 > 혼입 60% 시험체 순으로 나타났다.

재령 28일 쪼갬 인장강도에서는 2.5, 2.5 및 2.1MPa로 나타나 순환골재를 30% 혼입한 시험체의 경우 보통 콘크리트와 유사한 수준을 나타내었으며 순환골재 혼입량이 증가할수록 인장강도 다소 감소하는 경향을 보였다.

<표 *4.5*> 순환골재를 사용한 콘크리트의 재령에 따른 쪼갬 인장강도

시험체명	쪼갬 인장강도(MPa)			쪼갬 인장강도/압축강도(%)		
	7일	14일	28일	7일	14일	28일
WC0-N	2.1	2.3	2.5	9.5	10.2	9.9
WC30-N	2.0	2.2	2.5	9.8	10.0	10.2
WC60-N	1.7	2.0	2.1	9.3	9.6	9.9



[그림 4.6] 강섬유 무보강 순환골재 콘크리트의 재령에 따른 쪼갬 인장강도

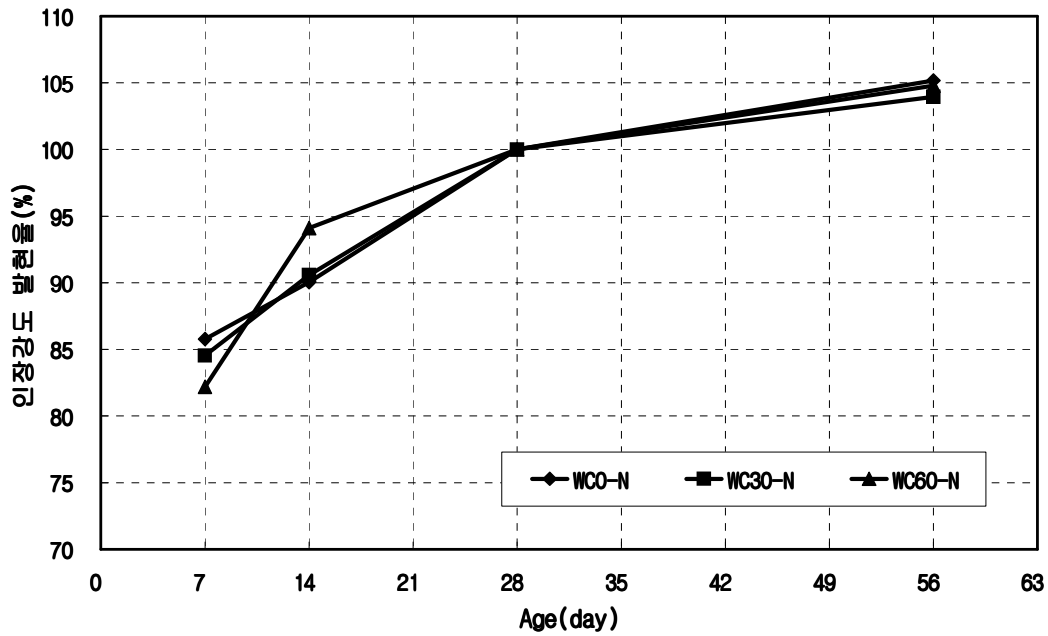
이는 앞의 압축강도와 마찬가지로 순환골재의 표면에 붙어있는 미립문과 순환골재의 생산방식에 따른 골재내부의 공극특성 등으로 순환골재 혼입량이 증가할수록 인장강도는 저하하는 것으로 사료된다.

순환골재를 사용한 콘크리트의 압축강도에 대한 인장강도 비는 보통 콘크리트와 마찬가지로 압축강도의 약 1/10 범위 내에서 인장강도를 발현하는 것으로 나타났다.

<표 4.6> 및 [그림 4.7]은 순환골재를 혼입한 콘크리트의 인장강도 발현율은 나타낸 것으로, 재령 28일 대비 재령 7일에 78~82%의 가장 큰 발현율을 보였다.

<표 *4.6*> 순환골재 혼입한 콘크리트의 재령에 따른 쪼갬 인장강도 발현율

시험체명	쪼갬 인장강도 발현율(%)			비 고
	7일	14일	28일	
WC0-N	82	92	100	
WC30-N	81	89	100	
WC60-N	78	92	100	



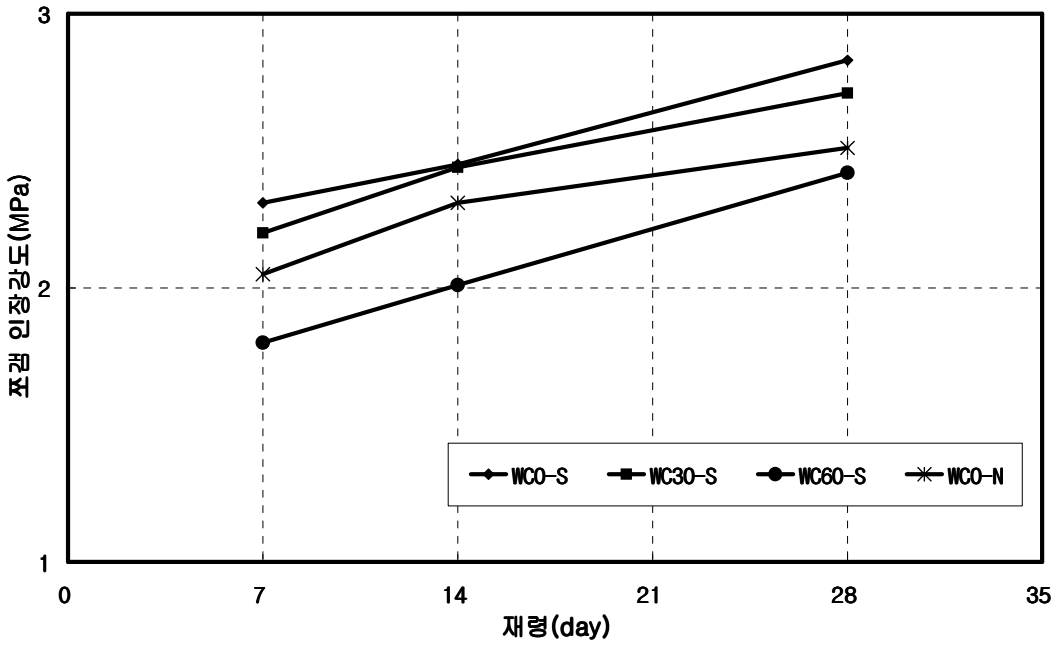
[그림 4.7] 강섬유 무보강 순환골재 콘크리트의 재령에 따른 인장강도 발현율

<표 4.7> 및 [그림 4.8]은 강섬유보강 순환골재 콘크리트의 혼입량과 재령에 따라 인장강도 변화를 나타낸 것으로 재령 7일에서의 기준 시험체, 순환골재를 혼입 30% 및 60% 시험체는 각각 2.3, 2.2 및 1.8MPa로 재령 14일에서는 각각 2.5, 2.4 및 2.0MPa로 혼입 30% 시험체≥보통콘크리트>혼입 60% 시험체 순으로 나타났다. 재령 28일에서는 2.8, 2.7 및 2.4로 혼입 60% 시험체는 보통 콘크리트와 혼입 30% 시험체에 비해 약 13%정도로 다소 낮은 인장강도 발현을 보였다.

<표 4.7>의 강섬유보강 순환골재 콘크리트의 압축강도와 인장강도의 비는 순환골재를 혼입한 콘크리트와 마찬가지로 보통 콘크리트 압축강도의 1/10 범위 내에서 인장강도를 발현하는 것으로 나타났다.

<표 *4.7*> 강섬유 보강 순환골재 콘크리트의 재령에 따른 쪼갬 인장강도

시험체명	쪼갬 인장강도(MPa)			쪼갬 인장강도/압축강도(%)			비 고
	7일	14일	28일	7일	14일	28일	
WC0-S	2.3	2.5	2.8	9.6	10.0	10.3	
WC30-S	2.2	2.4	2.7	9.8	10.1	10.2	
WC60-S	1.8	2.0	2.4	9.4	9.6	10.4	

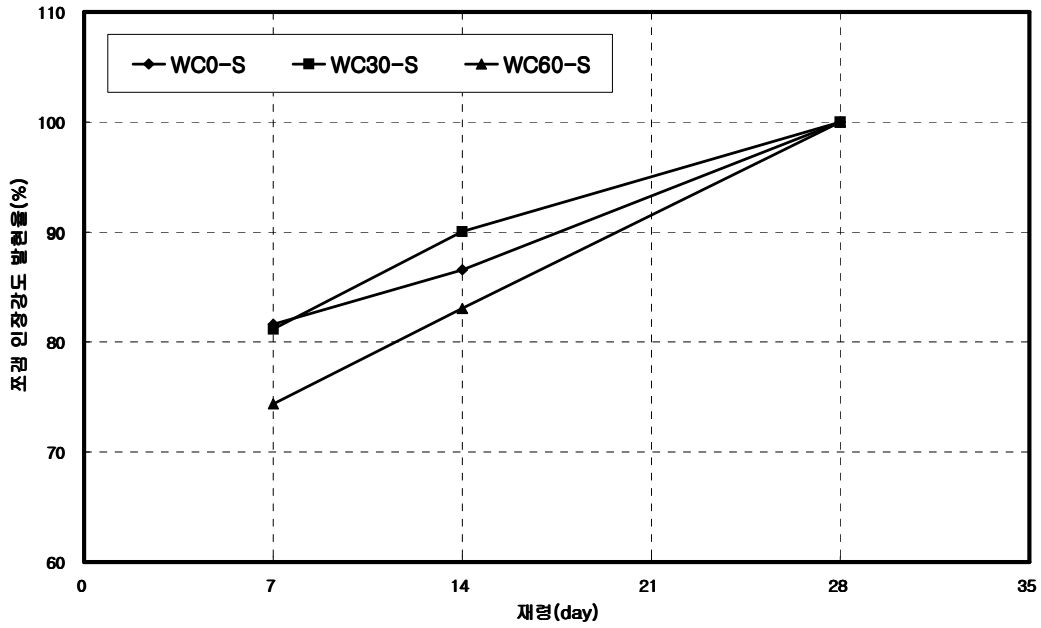


[그림 4.8] 강섬유 보강 순환골재 콘크리트의 재령에 따른 쪼갬 인장강도

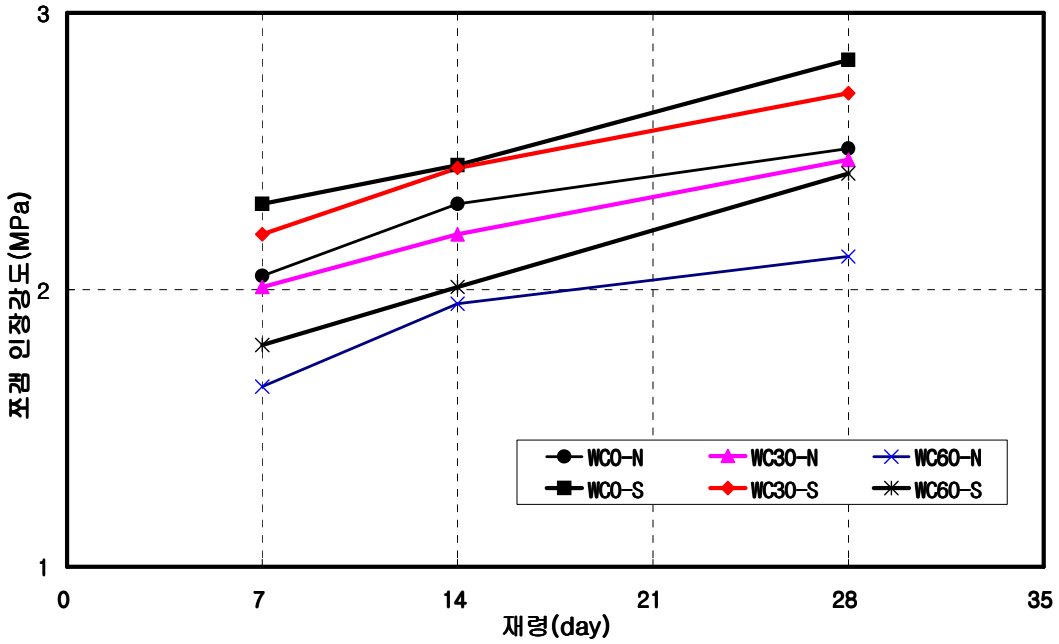
<표 4.8> 및 [그림 4.9]는 강섬유보강 순환골재 콘크리트의 재령에 따른 인장강도 발현율을 나타낸 것으로 재령 28일 대비 재령 7일에 74~82%정도의 가장 큰 인장강도 발현을 보였다.

<표 *4.8*> 강섬유보강 순환골재 콘크리트의 재령에 따른 쪼갬 인장강도 발현율

시험체명	쪼갬 인장강도 발현율(%)			비 고
	7일	14일	28일	
WC0-S	82	87	100	
WC30-S	81	90	100	
WC60-S	74	83	100	



[그림 4.9] **강섬유 보강 순환골재 콘크리트의 재령에 따른 쪼갬 인장강도 발현율**



[그림 4.10] 강섬유 보강 유무에 따른 순환골재 콘크리트의 재령에 따른 인장강도

쪼갬 인장강도 실험 결과, 압축강도와 마찬가지로 혼입율 30% 시험체는 기준 시험체와 거의 유사한 인장강도발현을 보였으며 강섬유 보강 유무와 상관없이 순환골재의 혼입율이 증가할수록 인장강도가 저하되는 경향을 보였다.

이는 순환골재의 표면에 붙어있는 미립분과 순환골재의 생산방식에 따른 골재내부의 공극특성 등으로 순환골재 혼입량이 증가할수록 인장강도는 저하하는 것으로 사료된다.

또한 순환골재 콘크리트에 강섬유를 보강함으로써 무보강 순환골재 콘크리트보다 인장강도가 증가하여 순환골재 콘크리트에 강섬유를 보강함으로써 인장강도는 증가하는 것으로 사료된다.

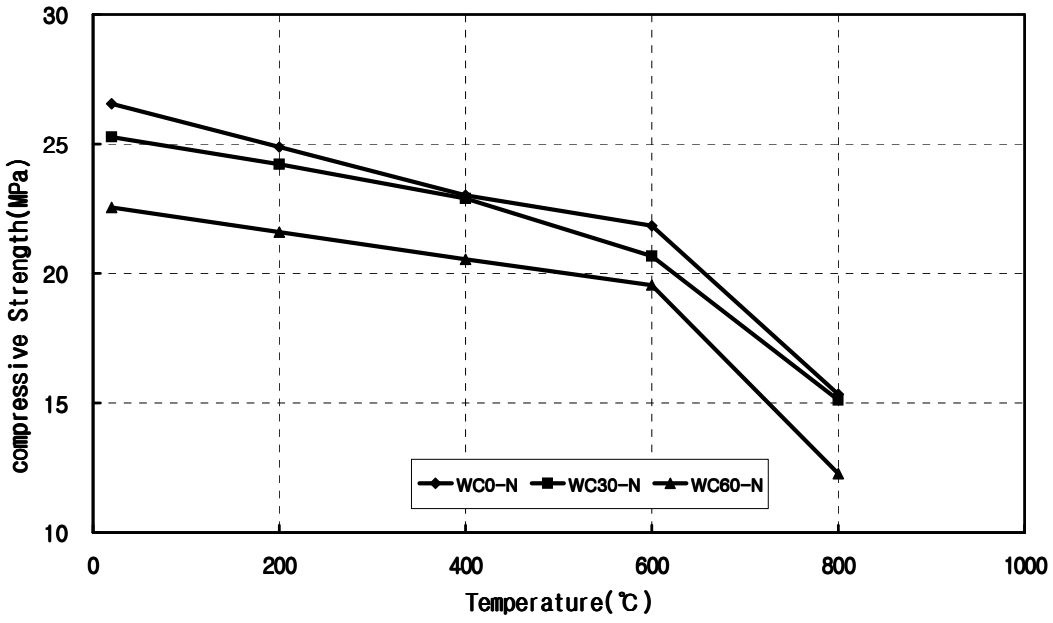
쪼갬 인장강도의 재령별 발현율은 순환골재를 혼입한 콘크리트의 경우, 재령 28일 대비 재령 7일에 78~82%로, 강섬유보강 순환골재 콘크리트는 74%~82%정도의 가장 큰 발현을 보였다. 시험체의 압축강도와 인장강도의 비는 보통 콘크리트와 마찬가지로 순환골재와 강섬유보강 순환골재 콘크리트도 콘크리트의 압축강도의 약 1/10 범위 내에 있어, 보통 콘크리트와 동등한 인장강도 발현하는 것으로 사료된다.

4.3 콘크리트 내화도(耐火度, *refractoriness*) 실험

<표 4.9> 및 [그림 4.11]~[그림 4.12]은 재령 56일 경과 후 보통 콘크리트와 순환골재를 혼입한 시험체를 내화도 실험기로 200℃, 400℃, 600℃, 800℃의 온도별로 30분간 가열한 후 압축강도 실험결과 및 압축강도 손실률을 나타낸 것이다.

<표 *4.9*> 순환골재를 혼입한 콘크리트의 내화도 실험 후 압축강도 실험 결과

시험체명	내화도 실험 후 압축강도 (MPa)					비 고
	상온	200℃	400℃	600℃	800℃	
WC0-N	26.6	24.9(6.3)	23.0(13.3)	21.8(17.7)	15.3(42.2)	
WC30-N	25.3	24.2(4.2)	22.9(9.4)	20.7(18.2)	15.1(40.2)	
WC60-N	22.6	21.6(4.2)	20.6(8.9)	19.6(13.3)	12.3(45.6)	
※ 주( ) 안의 비율은 비내화 기준시험체의 압축강도 손실률(%)						



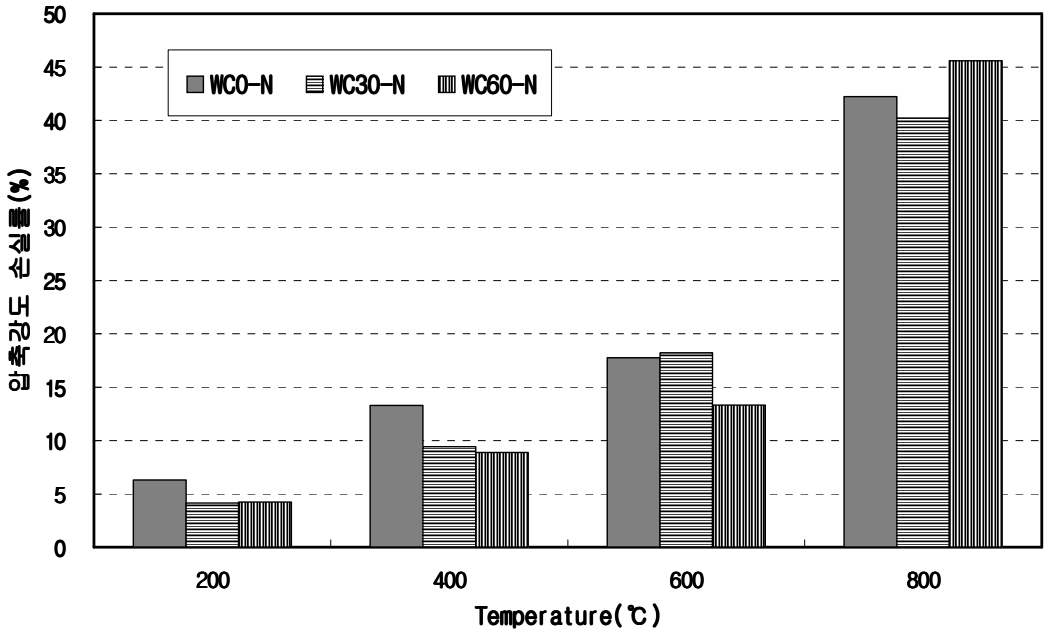
[그림 4.11] 강섬유 무보강 순환골재 콘크리트의 내화도 실험 후 압축강도

내화도 실험 후 압축강도 실험 결과, 내화도 200℃에서의 기준시험체, 순환골재 30% 및 60% 혼입 시험체의 각각 24.98, 24.2 및 21.6MPa, 400℃에서는 23.0, 22.9

및 20.6MPa, 600℃에서는 21.8, 20.7 및 19.6MPa, 800℃에서는 15.3, 15.1 및 12.3MPa로 나타났으며 순환골재를 60% 혼입한 시험체의 압축강도가 가장 낮은 경향을 보였다.

내화도 실험을 하지 않은 상온 시험체와 각 온도별 내화도를 한 시험체를 비교했을 경우 기준 시험체가 6.3~42.2% 정도, 순환골재 30% 혼입한 시험체가 4.2~40.2% 정도, 60% 혼입한 시험체가 4.2~45.6%로 차이를 보였다. 200℃에서는 보통 콘크리트와 순환골재를 혼입한 시험체의 내화도 온도에 따른 큰차이는 보이지 않으나 600~800℃에서는 약 24.5~32.3%정도 보통 콘크리트보다 순환골재를 혼입한 시험체의 압축강도 감소율이 높은 경향을 보였다.

기준 시험체가 순환골재를 사용한 시험체보다 온도별로 압축강도가 높게 나타났으며 순환골재의 혼입율이 높을수록 온도가 증가함에 따라 압축강도는 다소 저하하는 것으로 나타났으며, 내화도 실험 후 공시체의 표면 변색의 변화는 온도가 높아질수록 밝은 회색으로 변하였다.



[그림 4.12] 순환골재를 혼입한 콘크리트의 내화도 실험 후 압축강도 감소율

(a) 200℃ 가열 WC-N

(b) 200℃ 가열WC-S

(c) 400℃ WC-N

(d) 400℃ WC-S

(e) 600℃ WC-N

(f) 600℃ WC-S

(e) 800℃ WC-N *(f) 800℃ WC-S*

[사진 *4.3*] 내화도 실험후 시험체 전경

<표 4.10>및 [그림 4.13]~[그림 4.14]는 강섬유 보강 순환골재 시험체와 보통 콘크리트를 내화도 실험기로 온도별 공시체를 30분간 가열한 후 각 온도별 압축강도 및 압축강도 감소율을 나타낸 것이다.

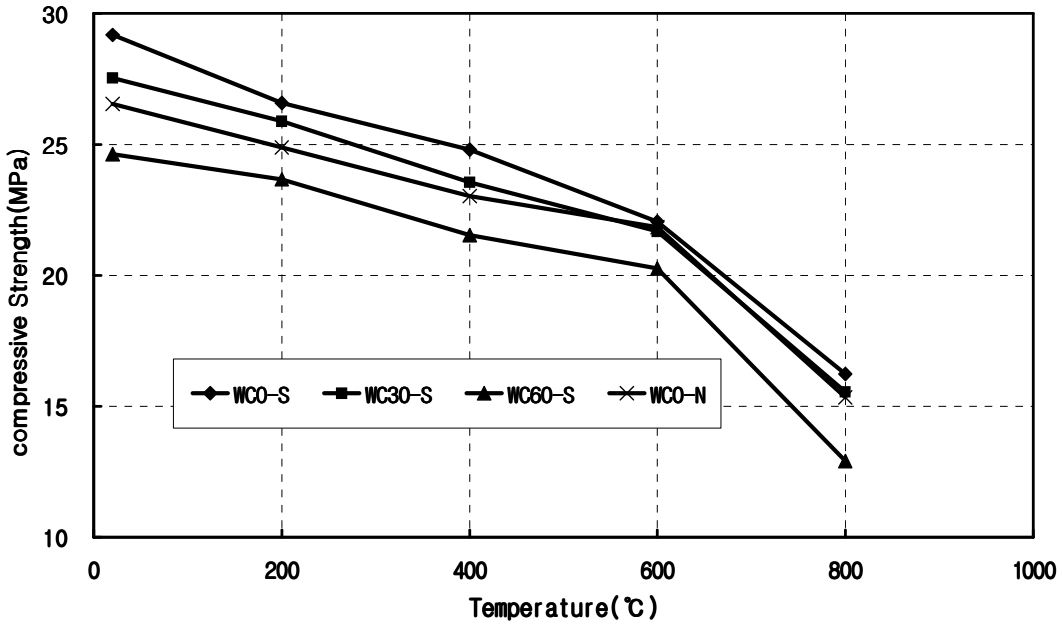
강섬유 보강 순환골재 시험체를 혼입율에 따라 재령 56일이 경과한 다음 내화도 실험 후 만능구조 실험기를 이용하여 온도별 압축강도 실험 결과, 앞의 무보강 순환골재를 혼입한 시험체와 마찬가지로 기준 시험체가 온도별 압축강도가 가장 높게 나타났으며, 강섬유보강 시험체에 순환골재의 혼입율이 높을수록 온도가 증가함에 따라 압축강도는 감소하는 것으로 나타났다.

이는 순환골재의 표면에 붙어있는 미립분에 따른 골재내부의 공극특성 등으로 부착성이 저하되어 내화도 실험후 압축강도는저하하는 것으로 사료된다.

<표 *4.10*> 강섬유 보강 순환골재 콘크리트의 내화도 실험 후 압축강도 실험 결과

시험체명	내화도 실험 후 압축강도 (MPa)					비 고
	상온	200℃	400℃	600℃	800℃	
WC0-S	29.2	26.6(8.9)	24.8(15.0)	22.1(24.4)	16.2(44.4)	
WC30-S	27.5	25.9(6.0)	23.6(14.5)	21.7(21.3)	15.6(43.5)	
WC60-S	24.6	23.7(3.9)	21.5(12.5)	20.3(17.7)	12.9(47.6)	
※ 주( ) 안의 비율은 비내화 기준시험체의 압축강도 손실률(%)						

내화도 200℃에서의 기준시험체, 폐콘크리트를 혼입 30% 및 혼입 60% 시험체의 각각 26.6, 25.9 및 23.7MPa, 400℃에서는 24.8, 23.6 및 21.5MPa, 600℃에서는 22.1, 21.68 및 20.3MPa, 800℃에서는 16.2, 15.6 및 12.9MPa로 나타났다.



[그림 4.13] 강섬유보강 순환골재 콘크리트의 내화도 실험 후 압축강도 결과

내화도 실험을 하지 않은 상온 시험체와 각 온도별 내화도를 한 시험체를 비교했을 경우 보통콘크리트 시험체가 5.5~35.2% 정도, 순환골재 30% 혼입한 시험체가 2.4~36.3% 정도, 60% 혼입한 시험체가 3.9~39.5%로 차이를 보였다.

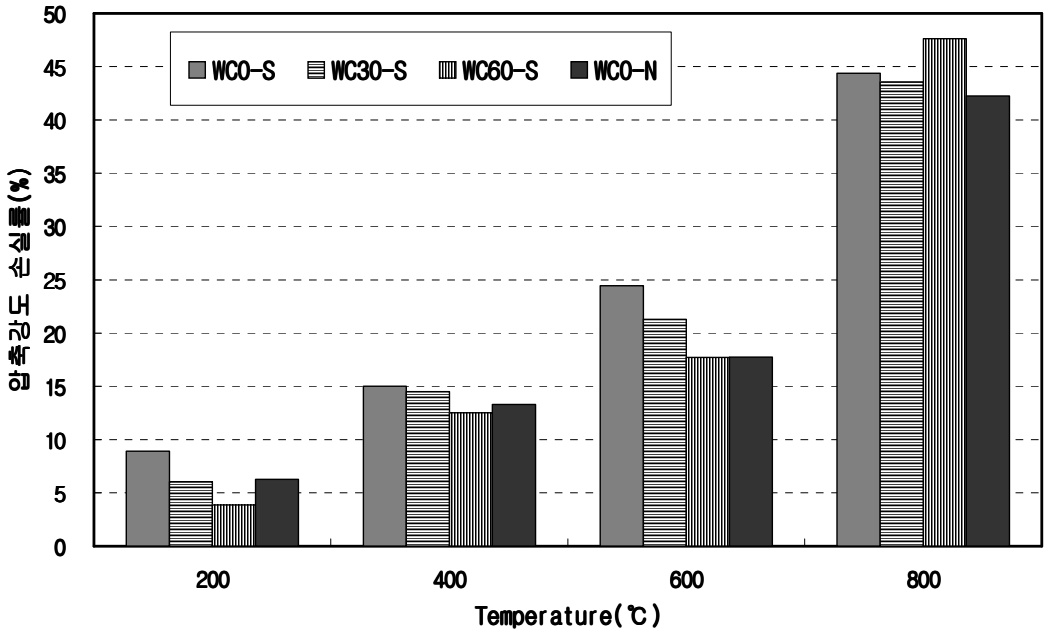
200℃에서는 보통콘크리트와 순환골재를 혼입한 시험체의 내화도 온도에 따른 큰차이는 보이지 않으나 600~800℃에서는 약 17.6~22.3%정도 보통 콘크리트보다 순환골재를 혼입한 시험체의 압축강도 감소율이 높은 경향을 보였다.

강섬유 보강 유무와 상관없이 순환골재의 혼입량이 증가할수록, 가열온도가 높을수록 압축강도가 저하하는 것으로 나타났으며, 특히 순환골재 60% 시험체는 다른 시험체에 비해 가장 큰 압축강도 감소율을 보였다.

이는 순환골재의 혼입량이 증가할수록 골재의 공극 증대에 의한 순환골재 콘크

리트의 부착력 및 결합력이 보통 콘크리트에 비해 부족한 것으로 사료된다.

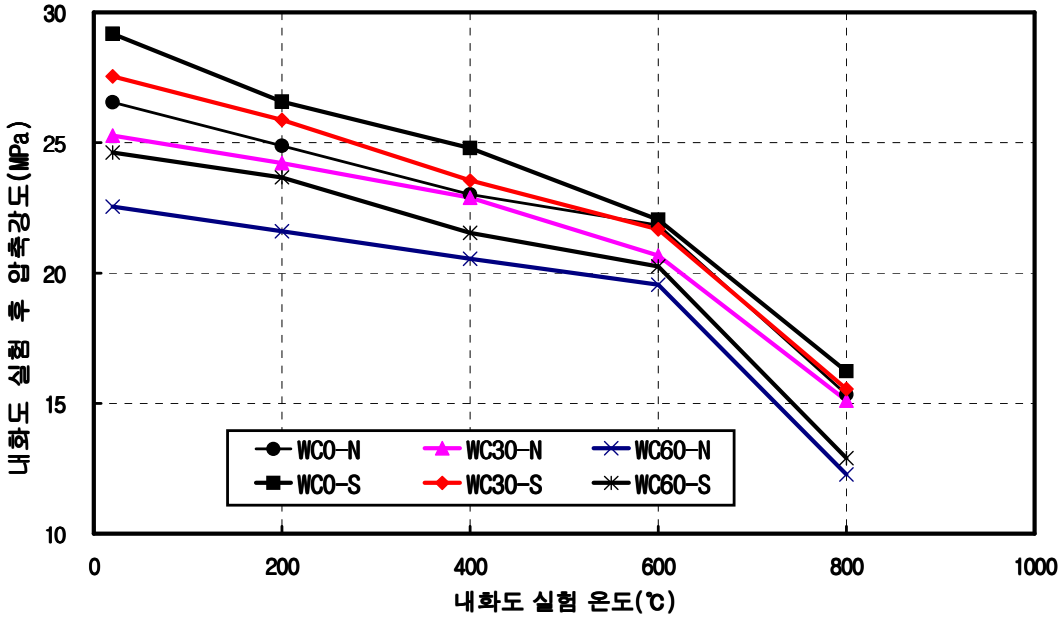
또한 강섬유를 보강한 시험체는 무보강 시험체보다 온도별로 다소 낮은 압축강도 감소율을 보였으나, 강섬유를 보강함으로써 내화성이 증진되는 경향을 보이지 않았다. 추후 강섬유 보강 순환골재 콘크리트의 내화성에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.



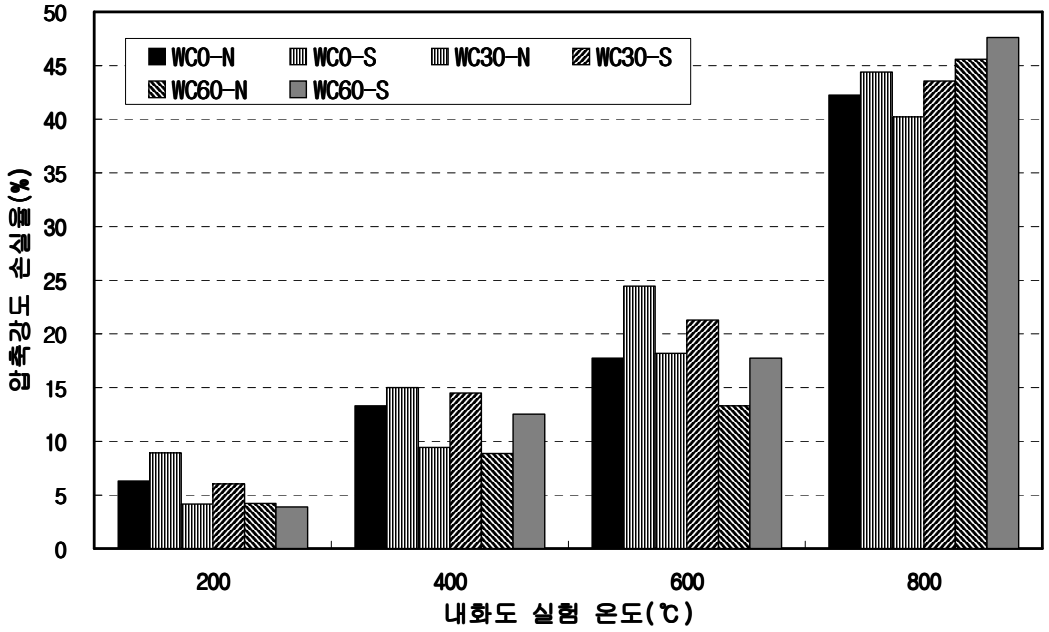
[그림 4.14] **강섬유보강 순환골재 콘크리트의 내화도 실험 후 압축강도 감소율**

내화도 실험 후 압축강도 실험 결과, 내화도 온도별로 기준시험체는 6.3~42.2% 정도, 순환골재 30% 혼입한 시험체가 4.2~40.2% 정도, 60% 혼입한 시험체가 4.2~45.6%로 압축강도가 크게 감소하였다.

강섬유 보강 순환골재 혼입 콘크리트 시험체는 5.5~35.2% 정도, 순환골재 30% 혼입한 시험체가 2.4~36.3% 정도, 60% 혼입한 시험체가 3.9~39.5%로 압축강도가 감소하여 순환골재의 혼입율이 증가할수록, 가열온도가 높을수록 압축강도가 저하하는 것으로 나타났다.



[그림 4.15] 강섬유 보강 유무에 따른 순환골재 콘크리트의 내화도 실험 후 압축강도

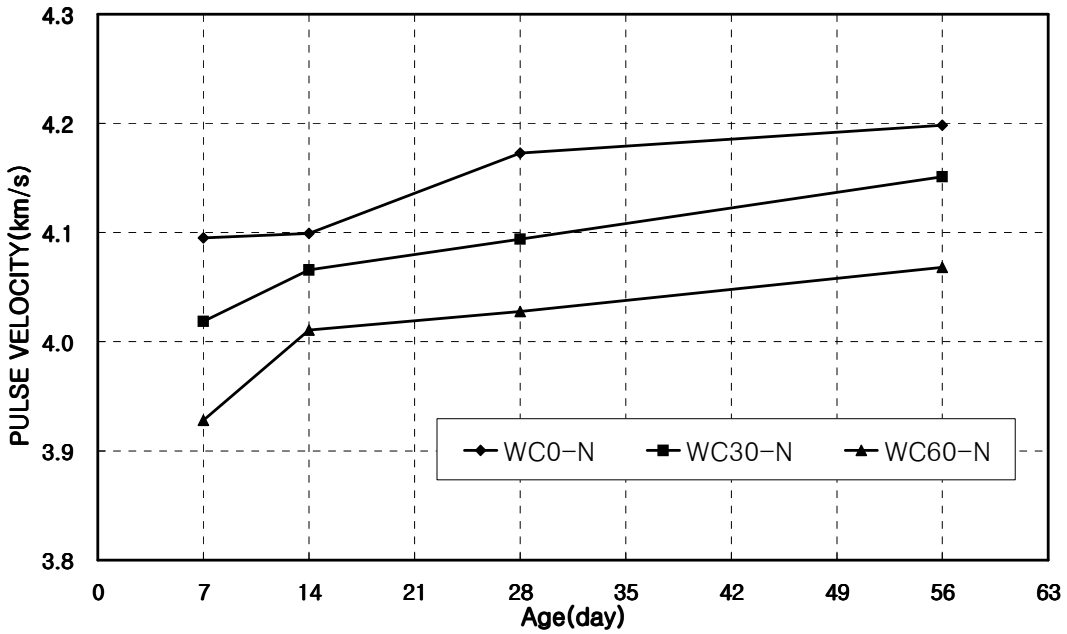


[그림 4.16] 강섬유 보강 유무에 따른 순환골재 콘크리트의 내화도 실험 후 압축강도 감소율

4.4 초음파속도 실험결과

<표 *4.11*> 강섬유 무보강 순환골재 콘크리트의 재령별 초음파속도

시험체명	대체 골재 함수율	순환골재 혼입율 (%)	초음파속도 V_p(㎞/sec)				비 고
			7일	14일	28일	60일	
WC0-N	내부 포수 표면 건조	0	4.09	4.10	4.17	4.20	
WC30-N		30	4.02	4.07	4.09	4.15	
WC60-N		60	3.93	4.01	4.03	4.07	



[그림 4.17] 강섬유 무보강 순환골재 콘크리트의 재령별 초음파속도

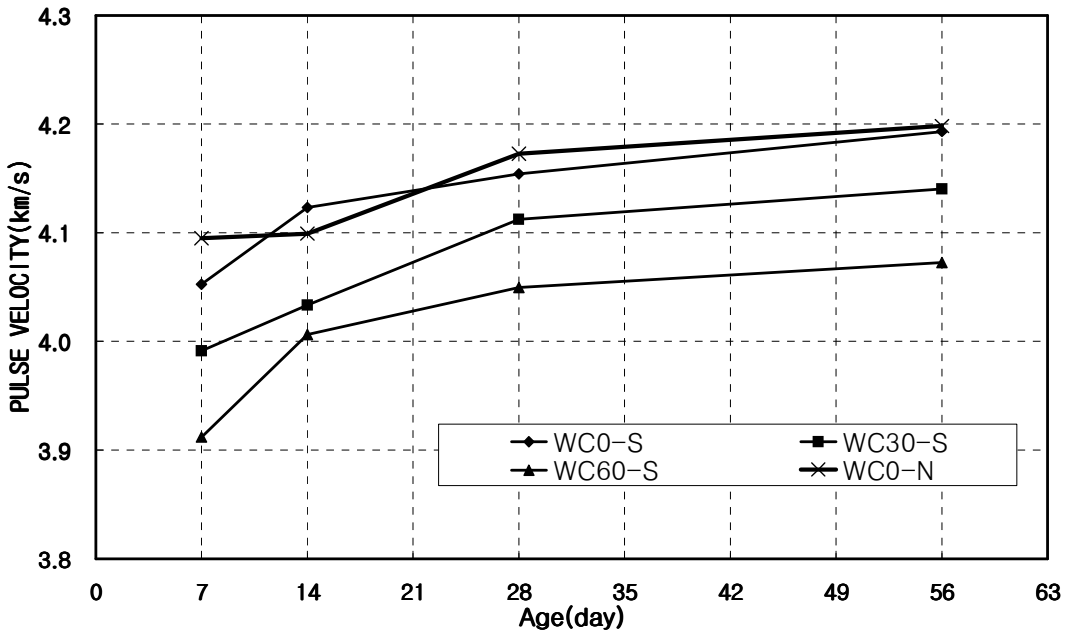
순환골재를 혼입한 콘크리트 혼입량과 재령에 따른 원주형 공시체 초음파속도의 실험 결과 는 <표 4.11> 및 [그림 4.17]과 같다.

재령 경과에 따른 순환골재의 혼입율에 비교했을 경우, 재령 7일에 기준 시험체는 혼입율 30% 시험체보다 1.9%, 혼입율 60% 시험체보다 4.1%, 재령 14일에 기준 시험체는 혼입율 30% 시험체보다 0.8%, 혼입율 60% 시험체보다 2.25%인 높은 강

도를 나타냈으며, 재령 28일에 기준 시험체는 혼입율 30% 시험체보다 1.9%, 혼입율 60% 시험체보다 3.5%, 재령 56일에 기준 시험체는 혼입율 30% 시험체보다 1.1%, 혼입율 60% 시험체보다 3.1%로 초음파속도가 전체적으로 보통콘크리트 시험체≥혼입율 30%>혼입율 60% 시험체 순으로 나타났다.

<표 *4.12*> 감성유 보강 순환골재 콘크리트의 재령별 초음파속도

시험체명	대체 골재 함수율	순환골재 혼입율 (%)	초음파속도 V_p(㎞/sec)				비 고
			7일	14일	28일	60일	
WC0-S	내부 포수 표면 건조	0	4.05	4.12	4.15	4.19	
WC30-S		30	3.99	4.03	4.11	4.14	
WC60-S		60	3.91	4.01	4.05	4.07	

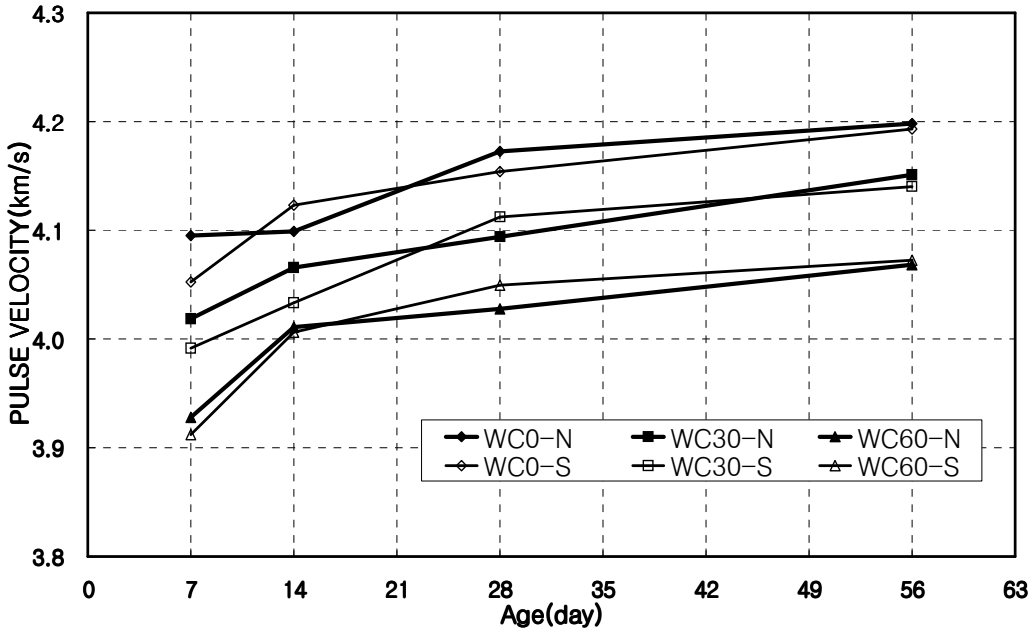


[그림 4.18] **강섬유 보강 순환골재를 콘크리트의 재령별 초음파속도**

강섬유보강 순환골재 혼입한 콘크리트 혼입량과 재령에 따른 원주형 공시체 초음파속도의 실험 결과 는 <표 4.12> 및 [그림 4.18]과 같다.

재령 경과에 따른 순환골재의 혼입율에 비교했을 경우, 재령 7일에 기준 시험체

는 혼입율 30% 시험체보다 1.51%, 혼입율 60% 시험체보다 3.5%, 재령 14일에 기준 시험체는 혼입율 30% 시험체보다 2.2%, 혼입율 60% 시험체보다 2.84%인 높은 강도를 나타냈으며, 재령 28일에 기준 시험체는 혼입율 30% 시험체보다 1.0%, 혼입율 60% 시험체보다 2.5%, 재령 56일에 기준 시험체는 혼입율 30% 시험체보다 1.3%, 혼입율 60% 시험체보다 2.9%로 초음파속도가 전체적으로 보통콘크리트 시험체≥혼입 30%>혼입 60% 시험체 순으로 나타났다.



[그림 4.19] **강섬유 보강 유무에 따른 순환골재를 콘크리트의 재령별 초음파속도**

초음파 속도 실험 결과, 강섬유 보강 유뮤에 따른 순환골재 콘크리트 시험체의 초음파속도를 비교하였을 경우, 재령 7일에서는 무보강 순환골재 시험체가 0.4~1.0%의 초음파속도가 높게 나타났다. 재령이 증가할수록 초음파 속도가 재령 56일에서 강섬유보강 시험체의 기준시험체와 30%혼입 시험체가 0.1~0.3%의 근소한 차이이지만 초음파속도가 높게 나타났으며 강섬유 보강에 따른 순환골재 콘크리트의 초음파속도 증진효과는 볼 수 없었다.

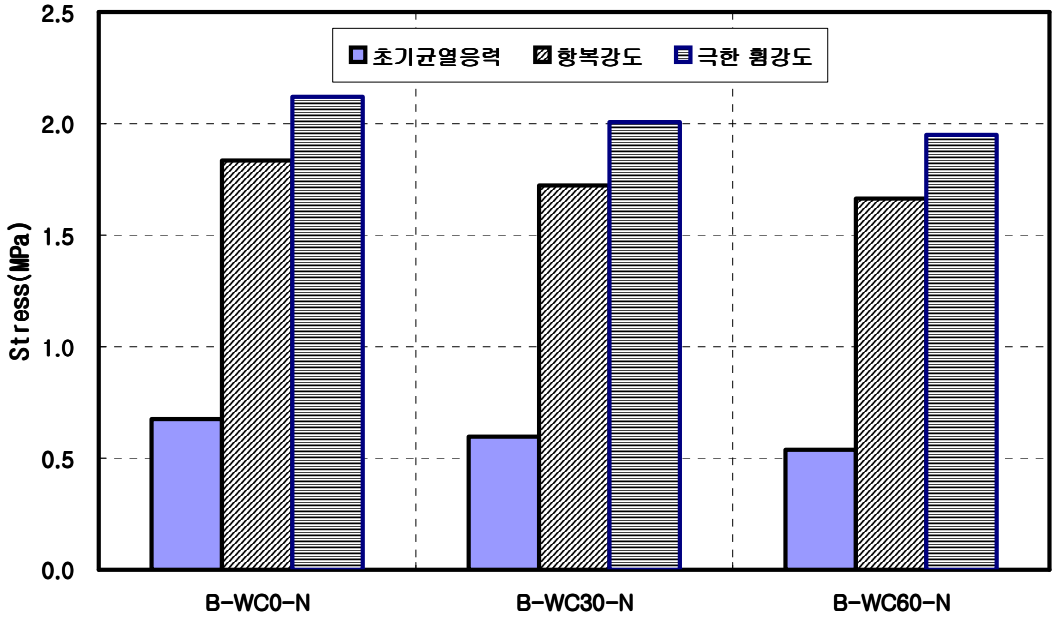
Ⅴ. 철근 콘크리트 보의 휨 실험결과

5.1 실험결과

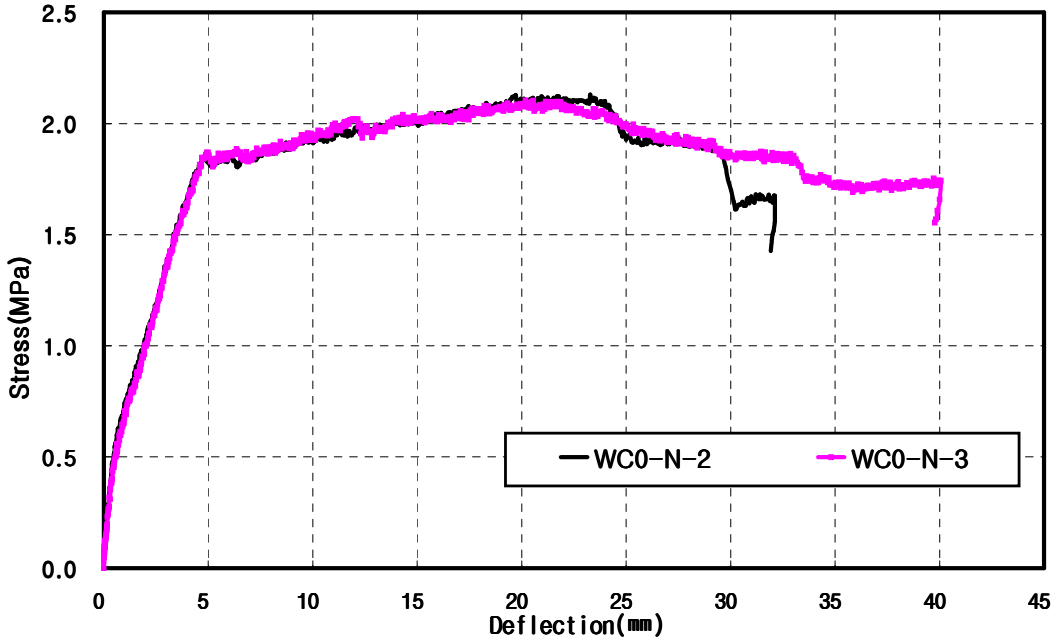
<표 5.1> 및 [그림 5.1]~[그림 5.4]는 강섬유 무보강 순환골재 시험체의 휨 실험결과를 나타낸 것으로, WC0-N 시험체가 2.12MPa로 극한 휨강도가 가장 높게 나왔다. WC30-N 시험체가 2.01MPa로 4.5%정도, WC60-N 시험체가 1.95MPa로 8.0% 정도 극한 휨강도가 낮게 나타났다.

<표 *5.1*> 강섬유 무보강 순환골재 시험체의 휨 실험결과

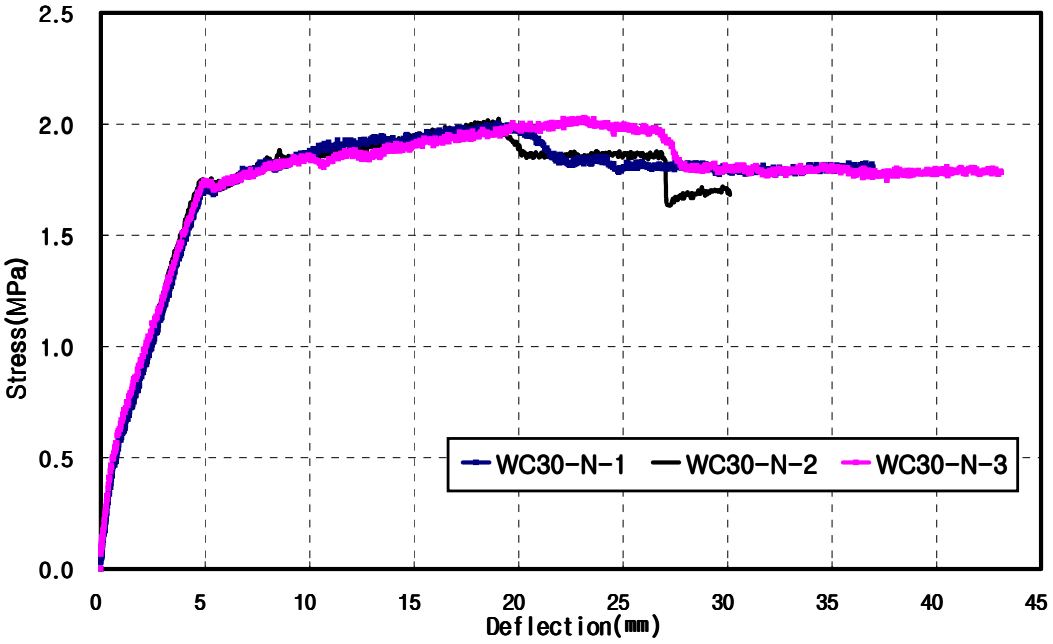
시험체명	초기균열응력				항복강도				극한 휨 강도			
	σ_{cu} *(MPa)*		δ_{cu} *(mm)*		σ_y *(MPa)*		δ_y *(mm)*		σ_u *(MPa)*		δ_u *(mm)*	
WC0-N1	0.70		0.94		1.83		5.05		2.13		19.72	
WC0-N2	-	0.68	0	0.80	-	1.84	-	5.05	-	2.12	-	19.63
WC0-N3	0.65		0.65		1.84		5.04		2.11		19.54	
WC30-N1	0.59		0.99		1.70		5.14		2.00		18.97	
WC30-N2	0.59	0.60	0.94	0.93	1.73	1.72	5.13	5.14	2.02	2.01	19.04	19.08
WC30-N3	0.61		0.87		1.74		5.14		2.00		19.24	
WC60-N1	0.51		0.75		1.66		5.30		1.89		15.20	
WC60-N2	0.50	0.54	0.66	0.76	1.65	1.66	5.33	5.23	1.99	1.95	16.07	16.95
WC60-N3	0.60		0.88		1.68		5.05		1.97		19.58	



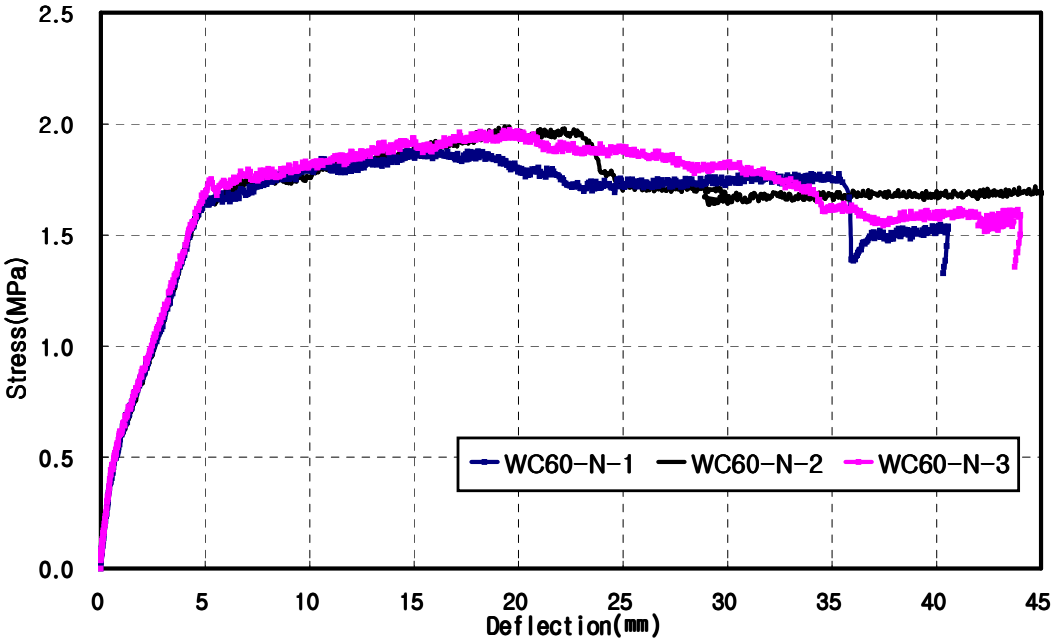
[그림 5.1] 강섬유 무보강 순환골재 시험체 휨 실험결과



[그림 5.2] WC0-N 시험체의 응력-처짐 곡선



[그림 5.3] WC30-N 시험체의 응력-처짐 곡선



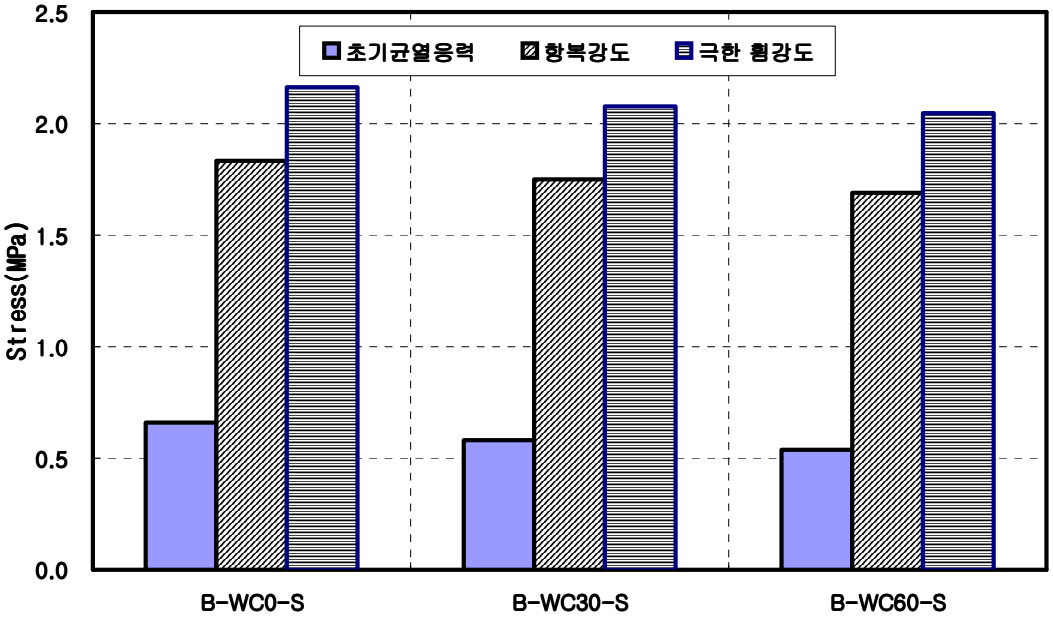
[그림 5.4] WC60-N 시험체의 응력-처짐 곡선

<표 5.2> 및 [그림 5.5]~[그림 5.8]은 강섬유 보강 순환골재 시험체의 휨 실험 결과를 나타낸 것으로, WC0-S 시험체가 2.16MPa로 극한 휨강도가 가장 높게 나왔다. WC30-S 시험체가 2.08MPa로 4.0%정도, WC60-S 시험체가 2.05MPa로 5.4% 정도 극한 휨강도가 낮게 나타났다.

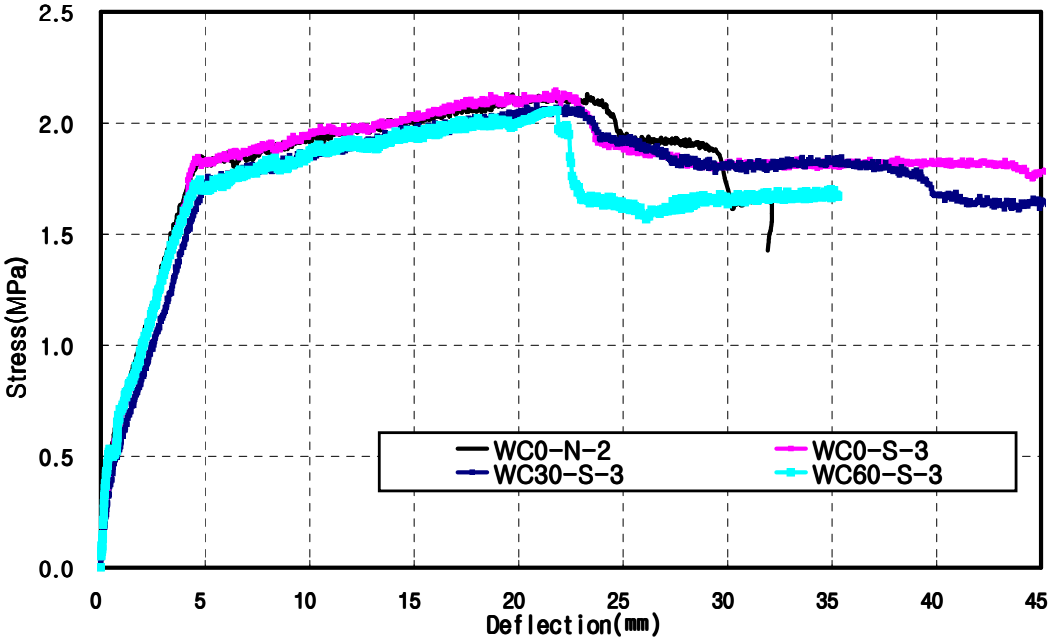
강섬유 보강 유무에 따라 순환골재 시험체의 휨 실험결과를 비교했을 경우, WC0-S 시험체가 WC0-N 시험체 보다 2.0% 정도, WC30-S 시험체가 WC30-N 시험체보다 3.5%정도, WC60-S 시험체가 WC60-N 시험체보다 5.0% 정도 극한 휨강도가 증가하였다. 또한 강섬유를 보강함으로써 초기균열응력이 다소 증가하여 강섬유를 보강함으로써 순환골재 시험체의 초기균열 및 휨내력 증대 효과가 있는 것으로 사료된다.

<표 *5.2*> 강섬유 보강 순환골재 시험체의 휨 실험결과

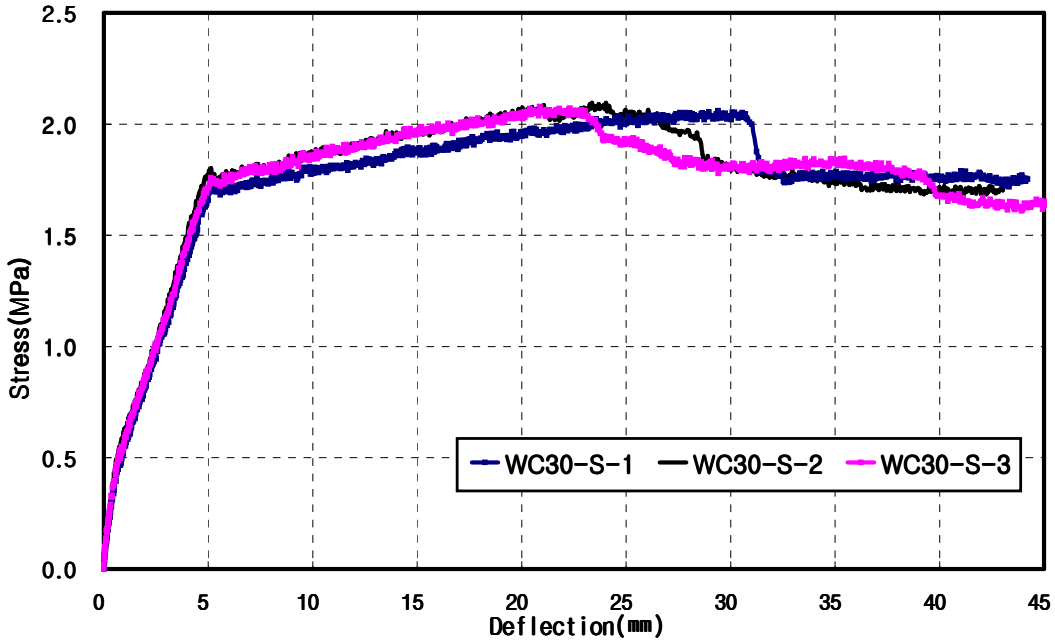
시험체명	초기균열응력				항복강도				극한 휨강도			
	σ_{cu} *(MPa)*		δ_{cu} *(mm)*		σ_y *(MPa)*		δ_y *(mm)*		σ_u *(MPa)*		δ_u *(mm)*	
WC0-S1	0.62		0.68		1.83		5.18		2.17		23.41	
WC0-S2	0.70	0.66	0.90	0.84	1.84	1.83	5.25	5.17	2.17	2.16	24.21	23.13
WC0-S3	0.66		0.93		1.83		5.07		2.15		21.78	
WC30-S1	0.59		1.09		1.71		5.35		2.05		25.5	
WC30-S2	0.63	0.58	0.98	0.95	1.80	1.75	5.13	5.24	2.10	2.08	23.36	23.24
WC30-S3	0.52		0.77		1.74		5.24		2.08		20.87	
WC60-S1	0.60		1.04		1.70		5.19		2.03		21.32	
WC60-S2	0.50	0.54	0.76	0.74	1.65	1.69	5.04	5.14	2.05	2.05	22.30	21.82
WC60-S3	0.51		0.42		1.72		5.19		2.06		21.85	



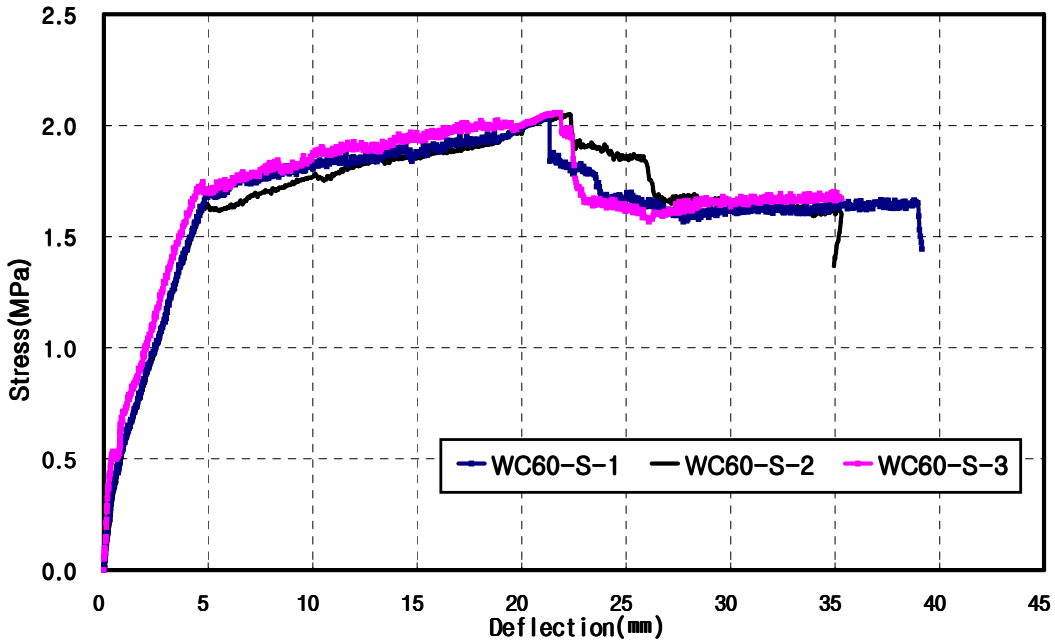
[그림 5.5] 강섬유 보강 순환골재 시험체의 휨 실험결과



(a) WC0-S

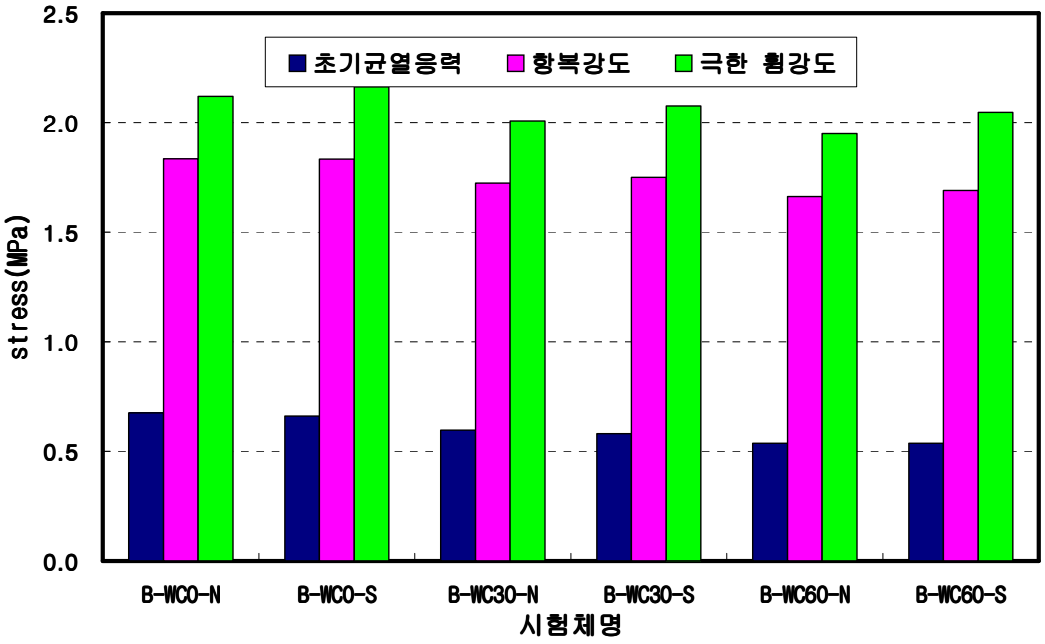


(b) WC30-S



(c) WC60-S

[그림 5.6] 강섬유 보강 순환골재 시험체의 응력-처짐 곡선



[그림 5.7] 강섬유 보강 유무에 따른 순환골재 시험체 휨 실험결과

5.2 균열 및 파괴 성상

5.2.1 강섬유 무보강 순환골재 휨 시험체의 균열 및 파괴 성상

(가) WC0-N-1 시험체

초기 균열은 부재 중앙부에서 재하응력 0.70MPa일 때 수직균열로 발생하였으며 재하 응력의 증가에 따라 부재 상부로 수직균열이 증대되었다.

2.05MPa일때 지점 지압파괴 현상이 나타났으며 시험체의 극한 휨강도 2.13MPa 후 응력은 감소하였으나 부재의 처짐은 계속 증가하였다. 부재의 중앙부에서 휨균열에 의해서 파괴되었다.

(나) WC0-N-3 시험체

초기 균열은 부재 중앙부에서 재하응력 0.68MPa일 때 수직균열로 발생하였으며 재하 응력 증가에 따라 부재 상부로 수직균열이 증대되었다.

1.91MPa 일때 중앙부 지점에서 지압파괴 현상이 나타났으며 시험체의 극한 휨강도는 2.11MPa로 나타났다. 극한 휨강도 후 응력은 감소하였으나 부재의 처짐은 계속 증가하였으며 부재의 중앙에서 지압파괴에 의한 콘크리트가 탈락되었다. 중앙부의 지점 지압파괴 및 휨균열에 의해서 시험체는 파괴되었다.

(다) WC30-N-1 시험체

초기 균열은 부재 중앙부 하부에서 재하 응력 0.59MPa일 때 수직균열로 발생하였으며 재하 응력의 증가에 따라 수직균열이 상부로 증대되었다.

시험체의 극한 휨강도는 2.0MPa로 나타났으며 극한 휨강도 후 응력은 감소하였으나 부재의 처짐은 계속 증가하였다. 부재의 중앙에서 콘크리트가 탈락되었으며 중앙부의 휨균열에 의해서 시험체는 파괴되었다.

(라) WC30-N-2 시험체

초기 균열은 부재 중앙부에서 재하 응력 0.59MPa일 때 수직균열로 발생하였으며 재하 응력의 증가에 따라 부재 상부로 수직균열이 증대되었다.

재하 응력 1.81MPa 일때 지압파괴현상이 나타났으며 시험체의 극한 휨강도 75.9MPa 후 응력은 감소하였으나 부재의 휨균열 및 처짐은 계속 증가하였다. 부재의 중앙에서 지압파괴에 의한 콘크리트가 탈락 및 휨균열에 의해서 시험체는 파괴되었다.

(마) WC30-N-3 시험체

초기 균열은 부재 중앙부 하부에서 0.59MPa일 때 수직균열로 발생하였으며 재하 응력의 증가에 따라 수직균열이 상부로 증대되었다.

시험체의 극한 휨강도는 2.01MPa로 나타났다. 극한 휨강도 후 응력은 감소하였으나 부재의 처짐 및 휨균열은 계속 증가하였다. 부재의 중앙에서 휨균열 및 콘크리트가 탈락에 의해서 시험체는 파괴되었다.

(바) WC60-N-1 시험체

초기 균열은 부재 중앙부에서 재하 응력 0.51MPa일 때 수직균열로 발생하였으며 재하 응력 증가에 따라 부재 상부로 수직균열이 증대되었다.

시험체의 극한 휨강도는 1.89MPa로 나타났으며 극한 휨강도 후 응력은 감소하는 것으로 나타났다. 또한 응력은 감소하였으나 부재의 처짐은 계속 증가하였으며 부재의 중앙에서 휨균열에 의해서 시험체는 파괴되었다.

(사) WC60-N-2 시험체

초기 균열은 부재 중앙부에서 재하 응력 0.50MPa일 때 수직균열로 발생하였으며 재하 응력 증가에 따라 부재 상부로 수직균열이 증대되었다.

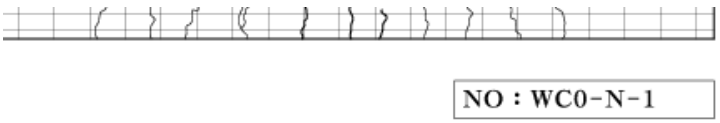
재하하중 1.68MPa 일때 중앙부에서 지압파괴 현상이 보였으며 시험체의 극한 휨강도 74.5MPa 후 응력은 감소하였으나 부재의 처짐은 계속 증가하였다. 부재의 중앙에서 콘크리트가 탈락되었으며 휨균열에 의해서 시험체는 파괴되었다.

(아) WC60-N-2 시험체

초기 균열은 부재 좌측에서 재하 응력 0.60MPa일 때 수직균열로 발생하였으며

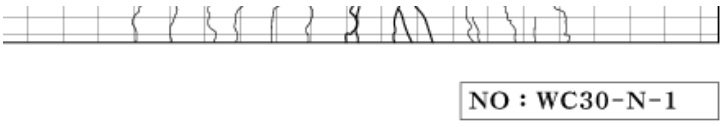
재하 응력 증가에 따라 부재 상부로 수직균열이 증대되었다.

재하 응력 1.71MPa일때 중앙부 지압파괴 현상이 나타났으며 시험체의 극한 휨강도 1.97MPa 후 응력은 감소하였으나 부재의 처짐 및 휨균열은 계속 증가하였다. 중앙부의 수직균열에 의해서 시험체는 파괴되었다.

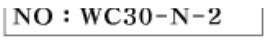


(a) WC0-N-1

(b) WC0-N-3

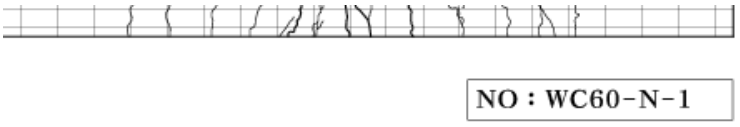


(c) WC30-N-1



(d) WC30-N-2

(e) WC30-N-3



(f) WC60-N-1

(g) WC60-N-2

(h) WC60-N-3

[그림 5.8] **강섬유 무보강 순환골재 휨 시험체의 균열도**

5.2.2 강섬유 보강 순환골재 휨 시험체의 균열 및 파괴 성상

(가) WC0-S-1 시험체

초기 균열은 부재 중앙부에서 재하 응력 0.62MPa일 때 수직균열로 발생하였으며 재하 응력의 증가에 따라 부재 상부로 수직균열이 증대되었다.

1.87MPa일때 지점 지압파괴 현상이 나타났으며 시험체의 극한 휨강도 81.1MPa 후 응력은 감소하였으나 중앙부의 처짐 및 휨균열은 계속 증가하였다. 부재의 중앙부에서 상부 콘크리트 탈락 및 휨균열에 의해서 파괴되었다.

(나) WC0-S-2 시험체

초기 균열은 부재 중앙부에서 재하 응력 0.70MPa일 때 수직균열로 발생하였으며 재하 응력 증가에 따라 부재 상부로 수직균열이 증대되었다.

69.0MPa 일때 중앙부 지점에서 지압파괴 현상이 나타났으며 시험체의 극한 휨강도는 2.17MPa로 나타났다. 극한 휨강도 후 응력은 감소하였으나 부재의 처짐 및 중앙부 주변 휨균열은 증가하였다. 중앙부의 지압파괴에 의한 콘크리트 탈락 및 휨균열에 의해서 시험체는 파괴되었다.

(다) WC0-S-3 시험체

초기 균열은 부재 중앙부 하부에서 재하 응력 0.67MPa일 때 수직균열로 발생하였으며 재하 응력의 증가에 따라 수직균열이 상부로 증대되었다.

재하 응력 1.67MPa 일때 중앙부 상부에서 지압파괴 현상이 나타났으며 시험체의 극한 휨강도 2.15MPa 후 응력은 감소하였으나 부재의 처짐 및 균열은 계속 증가하였다. 부재의 중앙에서 콘크리트가 탈락되었으며 중앙부의 휨균열에 의해서 시험체는 파괴되었다.

(라) WC30-S-1 시험체

초기 균열은 부재 중앙부에서 재하 응력 0.59MPa일 때 수직균열로 발생하였으며 재하 응력의 증가에 따라 부재 상부로 수직균열이 증대되었다.

재하 응력 67.0MPa 일때 지압파괴현상이 나타났으며 시험체의 극한 휨강도 2.05MPa 후 응력은 감소하였으나 부재의 휨균열 및 처짐은 계속 증가하였다. 부재의 중앙부 콘크리트가 탈락 및 휨균열에 의해서 시험체는 파괴되었다.

(마) WC30-S-2 시험체

초기 균열은 부재 중앙부 하부에서 0.63MPa일 때 수직균열로 발생하였으며 재하 응력의 증가에 따라 수직균열이 상부로 증대되었다.

시험체의 극한 휨강도는 2.10MPa로 나타났다. 극한 휨강도 후 응력은 감소하였으나 부재의 처짐 및 휨균열은 계속 증가하였다. 부재의 중앙부 휨균열에 의해서 시험체는 파괴되었다.

(바) WC30-S-3 시험체

초기 균열은 부재 중앙부에서 재하 응력 0.52MPa일 때 수직균열로 발생하였으며 재하 응력의 증가에 따라 부재 상부로 수직균열이 증대되었다.

시험체의 극한 휨강도는 2.08MPa로 나타났으며 극한 휨강도 후 응력은 감소하는 것으로 나타났다. 또한 응력은 감소하였으나 부재의 처짐은 계속 증가하였으며 부재의 중앙에서 콘크리트 탈락 및 휨균열에 의해서 시험체는 파괴되었다.

(사) WC60-S-1 시험체

초기 균열은 부재 중앙부에서 재하 응력 0.60MPa일 때 수직균열로 발생하였으며 재하 응력의 증가에 따라 부재 상부로 수직균열이 증대되었다.

재하 응력 1.76MPa 일때 중앙부에서 지압파괴 현상이 보였으며 시험체의 극한 휨

강도는 76.2MPa으로 나타났다. 극한 휨강도 이후 응력은 감소하였으나 부재의 처짐은 계속 증가하였다. 부재의 중앙에서 콘크리트가 탈락되었으며 휨균열에 의해서 시험체는 파괴되었다.

(아) WC60-S-2 시험체

초기 균열은 부재 좌측에서 재하 응력 0.50MPa일 때 수직균열로 발생하였으며 재하 응력의 증가에 따라 부재 상부로 수직균열이 증대되었다.

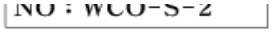
재하 응력 1.87MPa일때 중앙부 지압파괴 현상이 나타났으며 시험체의 극한 휨강도 2.05MPa 후 응력은 감소하였으나 부재의 처짐 및 휨균열은 계속 증가하였다. 중앙부의 수직균열 및 콘크리트 탈락에 의해서 시험체는 파괴되었다.

(자) WC60-S-3 시험체

초기 균열은 부재 좌측에서 재하 응력 0.51MPa일 때 수직균열로 발생하였으며 재하 응력의 증가에 따라 부재 상부로 수직균열이 증대되었다.

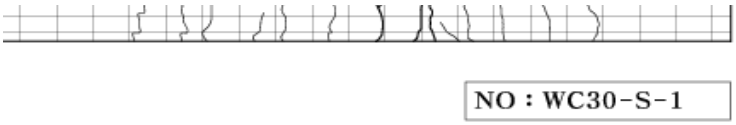
시험체의 극한 휨강도 2.05MPa 후 응력은 감소하였으나 부재의 처짐 및 휨균열은 계속 증가하였다. 중앙부의 수직균열에 의해서 시험체는 파괴되었다.

(a) WC0-S-1



(b) WC0-S-2

(c) WC0-S-3



(d) WC30-S-1

(e) WC30-S-2

(f) WC30-S-3

(g) WC60-S-1

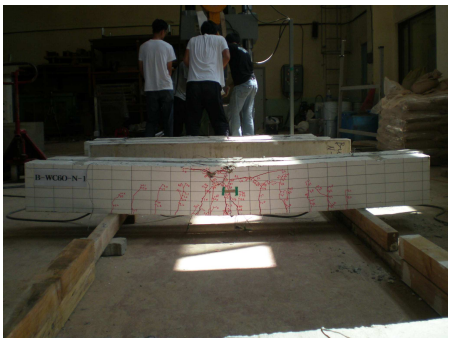
(h) WC60-S-2

(i) WC60-S-3

[그림 5.9] 강섬유 보강 순환골재 휨 시험체의 균열도

(a) WC0-N-3 시험체

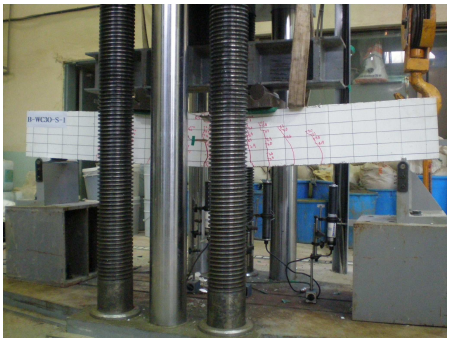
(b) WC30-N-1 시험체



(c) WC60-N-1 시험체

(d) WC0-S-1 시험체

(e) WC30-S-1 시험체



(f) WC60-S-1 시험체

[사진 5.1] 강섬유 보강 순환골재 휨 시험체의 파괴 후 전경

5.3 부재 시험체의 연성(延性) 평가

부재의 연성을 평가하기 위해서 부재의 항복시의 처짐을 기준으로 하여 부재 파괴시의 처짐을 비율로 나타냈다.

ACI Committee 363(American Concrete Institute, 2005) 에서는 식 (5-1)과 같이 연성계수를 정의하고 있다.

$$\mu_{cu} = \delta_{cu} / \delta_y \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (5\text{-}1)$$

μ_{cu} : 부재파괴시의 연성계수

δ_{cu} : 부재파괴시의 변위(㎜)

δ_y : 부재항복시의 변위(㎜)

또한 구조물이 견딜 수 있는 극한 하중을 더 이상 지지할 수 없을 때 파괴된다고 하는 파괴의 정의에 따라 식 (5-2)와 같이 평가하기도 한다.

본 연구에서는 식 (5-2)를 적용한다.

$$\mu_u = \delta_u / \delta_y \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (5\text{-}2)$$

μ_u : 극한 하중의 연성계수

δ_u : 극한 하중에 대응하는 변위(㎜)

<표 5.3> 및 [그림 5.10]는 강섬유 무보강 순환골재 휨 시험체의 연성계수를 나타낸 것으로 기준 시험체가 3.9, 순환골재 30% 혼입한 시험체가 3.7, 순환골재 60% 혼입한 시험체가 3.5로 기준시험체에 비해 순환골재 30% 시험체는 4.5%, 순환골재 60% 시험체는 6.4% 정도 연성계수가 낮게 나타났다.

<표 5.3> 강섬유 무보강 순환골재 시험체별 연성계수

시험체명	항복하중				극한 하중				연성계수		연성비	
	p_y (kN)		δ_y (mm)		p_u (kN)		δ_u (mm)		μ_u		실험값/기준값	
WC0-N1	68.5		5.1		79.8		19.7		3.9		1.00	
WC0-N2	-	68.8	-	5.1	-	79.4	-	19.6	-	3.9	-	1.00
WC0-N3	69.0		5.0		79.0		19.5		3.9		1.00	
WC30-N1	63.6		5.1		75.0		18.6		3.7		0.95	
WC30-N2	64.9	64.6	5.1	5.1	75.9	75.4	19.0	19.1	3.7	3.7	0.95	0.96
WC30-N3	65.2		5.1		75.2		19.2		3.7		0.96	
WC60-N1	62.3		5.3		70.7		15.2		2.9		0.74	
WC60-N2	61.8	62.4	5.3	5.2	74.5	73.0	16.1	16.9	3.0	3.5	0.78	0.84
WC60-N3	63.1		5.1		73.9		19.6		3.9		0.99	

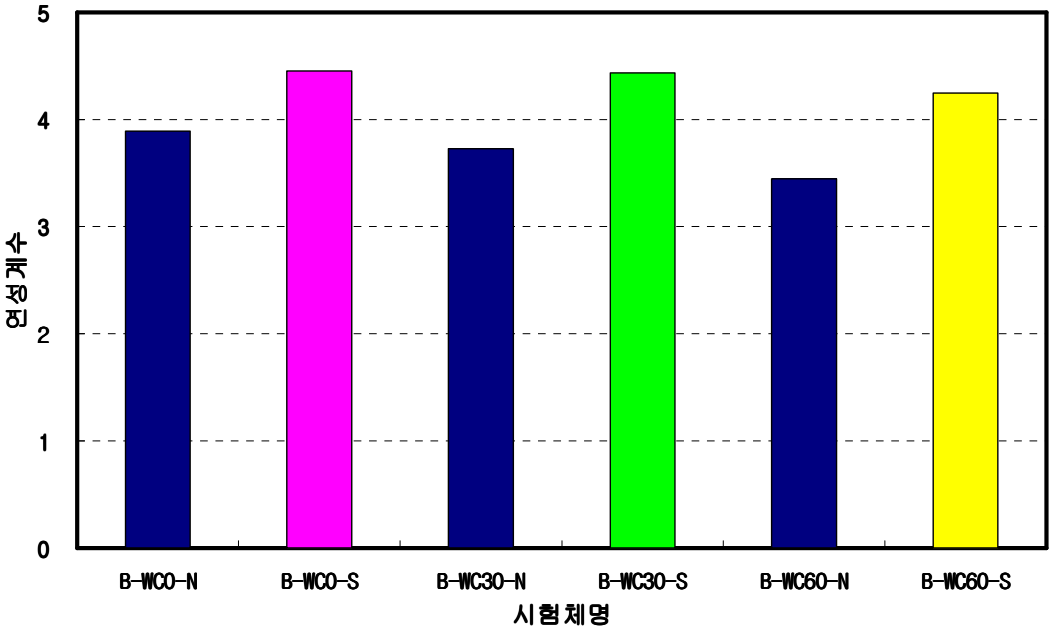
<표 5.4> 및 [그림 5.9]는 강섬유 보강 순환골재 휨 시험체의 연성계수를 나타낸 것으로 순환골재 0% 시험체가 4.5, 순환골재 30% 혼입한 시험체가 4.4, 순환골재 60% 혼한 시험체가 4.3%로 기준시험체에 비해 순환골재 30% 시험체는 0.4%, 순환골재 60% 시험체는 4.6% 정도 연성계수가 낮게 나타났다.

강섬유 보강 유무에 따른 순환골재 휨 시험체의 연성계수를 비교했을 경우, 강섬유 무혼입시험체에 비해 강섬유 보강 순환골재 0% 시험체는 15.0%, 순환골재 30% 시험체는 14.0%, 순환골재 60% 시험체는 9.2% 정도 연성계수가 증가하는 것으로 나타났다.

따라서 순환골재의 혼입량이 증가할수록 연성이 저하되는 현상은 강섬유를 보강함으로써 연성을 향상 시킬수 있을 것으로 사료된다. 또한 강섬유 무보강 시험체의 연성이 3.45인데 반해 강섬유를 보강함으로써 4.3정도로 기준시험체보다 높은 연성을 보여 일반 쇄석에 대해서 순환골재를 60%까지 치환 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

<표 5.4> 강섬유 보강 순환골재 시험체별 연성계수

시험체명	항복하중				극한 하중				연성계수		연성비	
	p_y (kN)		δ_y (mm)		p_u (kN)		δ_u (mm)		μ_u		실험값/기준값	
WC0-S1	68.5		5.2		81.1		23.4		4.5		1.01	
WC0-S2	69.0	68.7	5.3	5.2	81.3	79.4	24.2	23.1	4.6	4.5	1.04	1.00
WC0-S3	68.7		5.1		80.5		21.8		4.3		0.96	
WC30-S1	64.1		5.4		76.9		25.5		4.8		1.16	
WC30-S2	67.6	65.8	5.1	5.2	78.6	77.8	23.4	23.2	4.6	4.4	1.02	0.99
WC30-S3	65.7		5.2		78.0		20.9		4.0		0.89	
WC60-S1	63.6		5.2		76.2		21.3		4.1		0.92	
WC60-S2	61.7	63.3	5.0	5.1	76.9	76.6	22.3	21.8	4.4	4.3	0.99	0.95
WC60-S3	64.5		5.2		76.8		21.9		4.2		0.95	



[그림 5.10] 강섬유 보강 유무에 따른 순환골재 시험체별 연성계수

Ⅵ. 결론

본 연구는 폐콘크리트를 콘크리트용 대체 굵은골재로 사용하기 위해 순환골재 혼입량별(30%, 60%), 강섬유 보강에 따라 시험체를 제작하여 순환골재 및 강섬유가 철근콘크리트에 미치는 재료 및 구조적인 특성을 파악하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 재령별 압축강도 실험결과, 순환골재의 혼입량이 증가할수록 재령별로 강섬유 무보강 시험체는 3.8~17.2%, 강섬유 보강한 시험체는 4.3~18.2% 정도 저하되는 경향을 보였다.
   강섬유 보강 유·무에 따라 비교할 경우, 강섬유 보강한 시험체가 무보강 시험체보다 8.4~9.3% 정도 높게 나타났다.

2. 재령별 인장강도 실험결과, 순활골재의 혼입량이 증가할수록 재령별로 강섬유 무보강 시험체는 5.0~18.4%, 강섬유 보강 시험체는 0.4~21.8% 정도 낮은 경향을 보였다.
   강섬유 보강 유·무에 따라 비교할 경우, 강섬유 보강 시험체가 무보강 시험체보다 3.0~1.1% 정도 높게 나타났다.
   압축강도 결과와 인장강도 결과를 토대로 순환골재콘크리트에 강섬유를 보강하면 압축강도 및 인장강도 증대효과가 있는 것으로 사료된다.

3. 내화도 실험 후 압축강도 실험 결과, 무보강 및 보강 시험체에서 순환골재의 혼입량이 증가할수록 압축강도는 보통 콘크리트에 비해 다소 저하하는 것으로 나타났다.

4. 휨 실험결과, 순환골재 혼입량이 증가할수록 항복강도 및 극한 휨강도는 다소 저하되었으나 거의 유사한 거동을 하는 것으로 나타났다.
   또한 순환골재 혼입량이 증가할수록 연성계수는 저하되었으며 강섬유를 혼입한

순환골재 30% 혼입 시험체는 14.5% 정도, 순환골재 60% 시험체는 25.3% 정도 연성계수가 향상 되는 것으로 나타났다.

5. 각종 재료실험과 부재실험 결과를 종합한바, 순환골재 콘크리트에 강섬유를 보강함으로써 불순물로 분류되고 있는 폐콘크리트를 일반 쇄석에 대하여 강섬유를 보강하여 혼입율 60% 정도 까지 치환하여 사용하여도 일반 쇄석을 사용한 콘크리트와 거의 유사한 압축강도, 인장강도, 휨내력을 갖는 것으로 나타나 강섬유 보강 및 폐콘크리트를 사용한 철근 콘크리트 보의 실제 구조물에 대한 적용이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1) 김정섭외 “잔골재로 고막 패각을 사용한 철근콘크리트 보의 휨거동에 관한 연구”, 한국구조물진단학회 논문집, 제8권 4호, pp265～273, 2004.10

2) 김정섭외 3인, “패각류가 함유된 철근콘크리트 보의 내력 및 거동에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회 논문집, 제20권 1호, pp67～74, 2004.1

3) 김정섭외 4인, “혼화재를 사용한 철근콘크리트 보의 휨 거동에 관한 연구”, 대한건축학회 논문집, 제17권 3호, pp27～34, 2001.3

4) 양근현 외 2인, “골재의 함수상태가 재생골재 콘크리트의 특성에 미치는 영향”, 대한건축학회 논문집, 제21권 10호, pp103～110, 2005.10

5) 최희복외 2인, “재생골재 적용 콘크리트의 강도예측” 대한건축학회논문집, 제21권 6호, pp49～56, 2005.6.

6) 김병호 외 1인, “재생골재 콘크리트의 건조수축 및 크리프에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회 논문집, 제 21권 제2호, pp89～96, 2005.2.

7) 김정섭외 4인, “재생골재 혼입량에 따른 콘크리트 보의 역학적 특성에 관한 연구”, 한국구조물진단학회 학술발표논문집, 제11권 1호, pp183～188, 2007.05

8) 김정섭외 4인, “패각류가 함유된 해사를 사용한 철근콘크리트 보의 강도특성에 관한 실험적 연구” 대한건축학회 학술발표논문집, 제22권 1호, pp333～336, 2002.4

9) 윤현도 외 2인, “재생 잔골재를 사용한 철근콘크리트 보의 휨거동 및 인장철근의 이음 특성” 대한건축학회 학술발표논문집, 제25권 1호, pp429～432, 2005.10.

10) 김선호 외 3인, 재생골재의 함유량에 따른 철근콘크리트 보의 휨거동에 관한 연구, 대한건축학회 학술발표논문집, 제 22권 제1호, pp83～86, 2002.4.

11) 김정섭외 2인, “잔골재로 고막 패각을 사용한 철근콘크리트 보의 휨 거동에 관한 연구” 한국구조물진단학회 논문집, 제8권 4호, pp265～273, 2004.

12) 김광우외 3인, 콘크리트 재활용 실태 및 연구동향, 한국콘크리트학회 논문집, 제6권 6호, pp.51～65, 1994.12.

13) 이봉학 외 3인, 재생 폐콘크리트의 성능 향상에 관한 연구, 한국콘크리트학회 논문집, 제7권 2호, pp136～145, 1994..4

14) 이세현외 1인, “고강도 영역의 재생골재 콘크리트의 물리적 특성”, 한국콘크리트학회 논문집, 제 16권 6호, pp.575～583, 2001.12.

15) 김무한, “재생골재의 현황 및 재활용 방안”, 한국콘크리트학회 논문집 제 9권 6호, pp11～17, 1997.12,

16) 김무한, “건설폐기물 및 재생골재 콘크리트”, 한국콘크리트학회 논문집 제10권 6호, pp.52-60, 1998.12.

17) 김진만 외 9인, “콘크리트의 리사이클링”, 한국콘크리트학회 논문집, 제 15권 2호, pp.14-83, 2003.2.

18) 양근혁 외 1인, “고성능 콘크리트 특성에 미치는 재생골재 치환율의 영향”, 한국콘크리트학회 학술발표논문집, 제 16권 2호, pp.181～184, 2004.11.

19) 김무한 외 2인, 재생미분말이 가열온도에 따른 기초물성 및 시멘트 혼화재 적용성에 관한 연구, 한국콘크리트학회 학술발표논문집, 제13권 제1호, pp.635～640, 2001.5.

20) 윤형현, “재생골재 혼입량에 따른 콘크리트 보의 역학적 특성에 관한 연구”, 석사학위논문, 조선대학교, 2007.

21) 김경옥, “재생골재를 사용한 콘크리트 보의 구조적 특성에 관한 연구”, 박사학위논문, 조선대학교, 2007

22) 김우석, “강섬유보강 콘크리트의 거동에 관한 연구”, 박사학위논문, 금오공과대학교, 2003.

23) 김무한, “건설산업 폐기물의 리싸이클링 시스템 및 재활용 기술개발에 관한 연구“, 건설교통부, 1996

24) 김무한, “자원순환형 고품질 재생잔골재의 활용기술 개발”, 중소기업청, 2003

25) 김무한, “폐콘크리트 덩어리를 활용한 고품질 재생모래의 제조기술 및 자원 유효이용성 평가모델 개발”, 건설교통부, 2004

26) 최민수, “건설폐기물의 재활용 촉진을 위한 법제 정비 방안”, 한국건설산업연구원, 2002. 07
27) 최민수, “지역별 골재 소비구조 분석 및 수급안정 방안”, 한국건설산업연구원, 2003. 04
28) 한국골재협회, “골재산업의 중・장기 육성방안 연구”, 한국건설산업연구원, 2001. 12
29) 최민수 외 1인, “골재 채취 제도의 개선방안 연구”, 한국건설산업연구원, 2001.08
30) 최중기 외 1인, “공유수면 해사 부족량 추정 및 해사 채취 영향 평가 최종보고서”, 한국골재협회, 2002. 10
31) 환경부, “국가폐기물 관리 법률 및 시행령”. 2001
32) 한국자원재생공사, “폐기물 자원화 정보”, 1999
33) 한국자원재생공사, “건설폐기물 재활용 가이드라인 설정 및 재활용촉진 방안”, 1995
34) 한국건설산업연구원, 건설폐기물의 적정처리 및 재활용방안, 1996
35) 한국폐기물학회, 폐기물처리 기술과 재활용, 1995. 05
36) 환경부, 전국 폐기물 발생 및 처리현황, 2000
37) 건설교통부, 순환골재 품질기준안, 2005. 03
38) 환경부, 환경부 기본정책, 2001
39) 대한주택공사, 국내 재생(순환)골재의 생산 및 활용현황, 2004. 07

40) 한국콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준, 2007
41) 한국콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준 해설, 2007
42) 한국콘크리트학회, 표준시방서, 2003
43) 한국콘크리트학회, 표준시방서 해설, 2003
44) 대한건축학회, 건축공사 표준시방서, 2006
45) 한국콘크리트학회, 콘크리트의 재활용, 2004.12

46) Edited by Y. Kasai : Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 1 : Demolition Methods and Reuse, CHAPMAN AND HALL, 1988.

47) Edited by Y. Kasai : Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 2 : Demolition Methods and Reuse, CHAPMAN AND HALL, 1988.

48) Edited by Y. Erik K. Laulitzen : Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, F&FN Spon, 1994.

49) Edited by T.C Hansen : RILEM REPORT 6, Recycling of Demolished Concrete and Masonry, pp.109～110, E&FN SPON, 1989.

50) Edited by T.C. Hansen : RILEM REPORT 6, Recycling of Demolished Concrete and Masonry, pp116～122, E&FN SPON, 1989.

48) J. Vyncke and E, Rousseau : Recycling of Construction and Demolition Waste in Rousseau : Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, pp57～69, F&FN SPON, 1984.

51) R.J. Collins : Reuse of Demolition Materials in Relation to Specification in the U.K, Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, pp49～56, F&FN SPON, 1994.

52) C.J. Kibert : Concrete/Masonry Recycling Progress in the USA, Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, pp83～91, F&FN SPON, 1994.

53) R.-R. Schulz : The Processing of Building Rubble as Concrete Aggregate in Germany, Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, pp.105～116, F&FN SPON, 1994.

54) A. Morel and J.L. Gallias : Practical Guidelines for. The Use of Recycled Aggregates in Concrete in France and Spain, Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, pp.105～116, F&FN SPON, 1994.

55) A. Henrichsen : Report on Unified Specification of Recycled Coarse Aggregated for Concrete, Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, pp119～120, F&FN SPON, 1994.

부 록

사진 *1.* 철근 배근 전경

사진 *2.* 시험체 철근게이지 부착 후 전경

사진 *3.* 거푸집 전경

사진 *4.* 슬럼프 테스트

사진 *5. Ø100×200* 원주형 공시체 제작 전경

사진 *6.* 재령 *7*일 압축강도 실험 전경

사진 *7.* 재령 *28*일 압축강도 실험 전경

사진 *8.* 부재 시험체 연마 전경

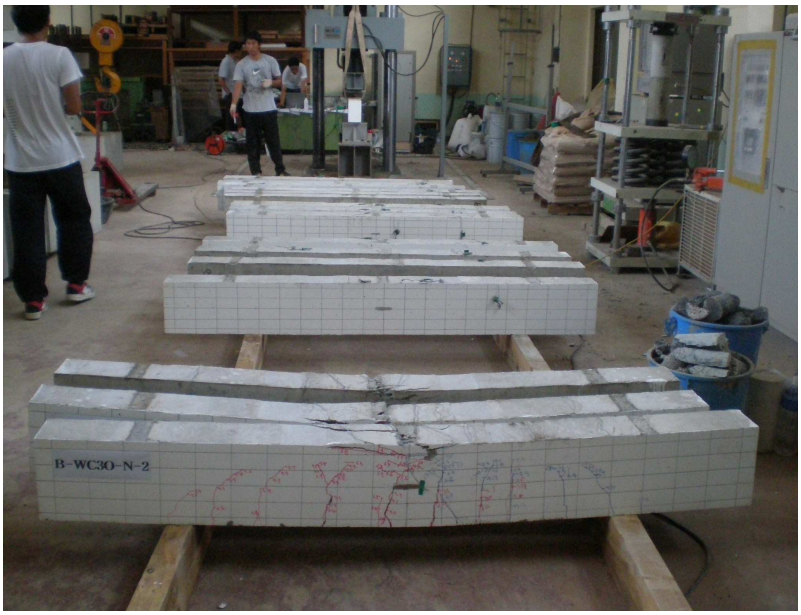


사진 *9. W30-N-2* 시험체 파괴 후 전경

사진 *10. WC30-N-3* 시험체 파괴 후 전경

사진 *11. WC60-N-2* 시험체 파괴 후 전경

사진 *12. WC60-N-3* 시험체 파괴 후 전경

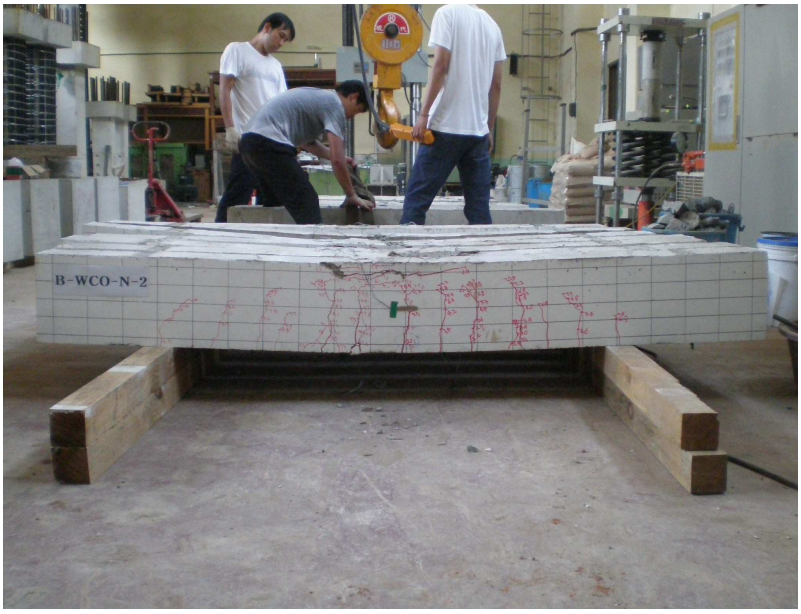


사진 *13. WC0-S-2* 시험체 파괴 후 전경

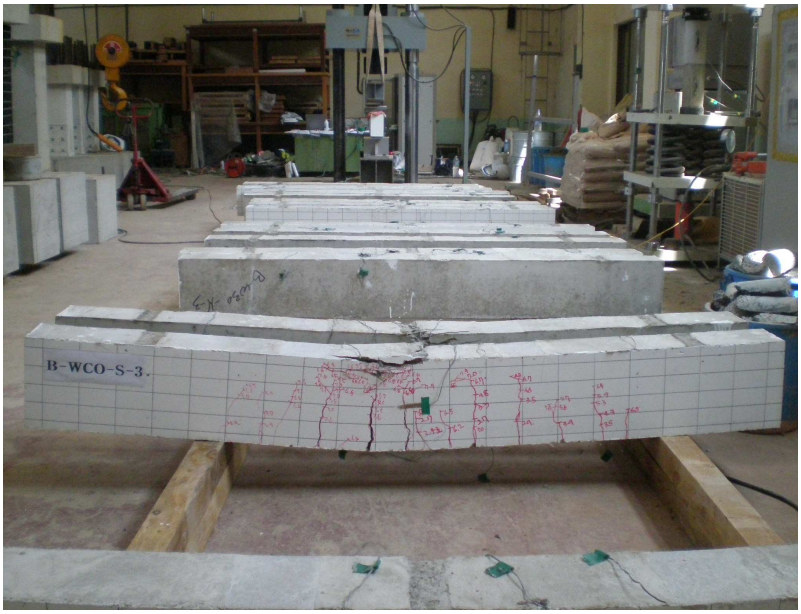


사진 *14. WC0-S-3* 시험체 파괴 후 전경

사진 *15. WC30-S-2* 시험체 파괴 후 전경

사진 *16. WC30-S-3* 시험체 파괴 후 전경

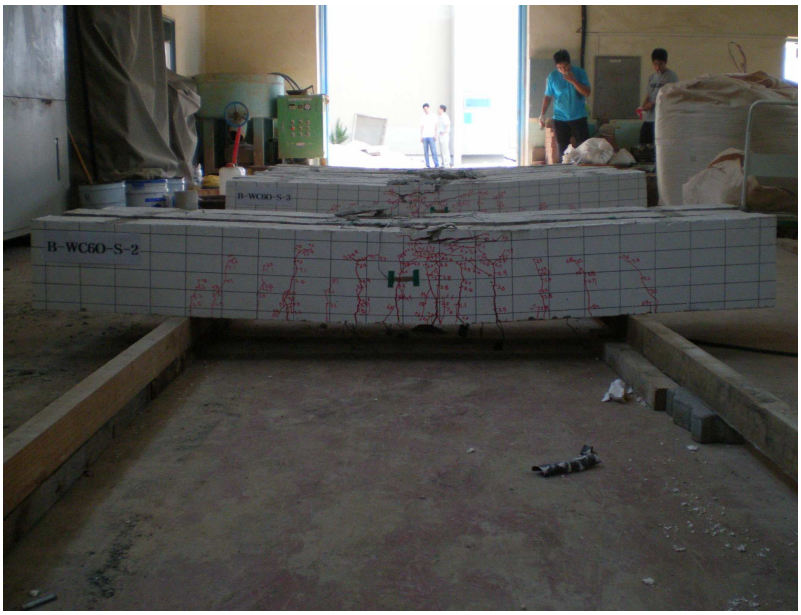


사진 *17. WC60-S-2* 시험체 파괴 후 전경

사진 *18. WC60-S-3* 시험체 파괴 후 전경