

纖維補強 시멘트 複合體의 凍結融解抵抗性 및 纖維 形態別 力學的 特性에 關한 研究

An Experimental Study on the Freeze-Thaw Durability and Mechanical Properties by the fiber types of Fiber Reinforced Cement Composites

박 승 범* 윤 의 식** 송 용 순***

ABSTRACT

In order to discuss the freeze-thaw durability of FRC and mechanical properties by the fiber types of FRC, experimental studies of FRC were carried out. The kinds of fiber used which are in CFRC are PAN-based and Pitch-based carbon fiber and in GFRC are alkali-resistance glass fiber. To examine the effects of the kinds, types (continuous fiber and Tow, Belt, Cloth) and contents of fiber and matrices, the following three methods CFRC and GFRC, Air cured, Water cured and Autoclaved CFRC and GFRC were tested. According to the test results, the flexural, tensile strength and toughness of FRC were remarkably influenced by types of fiber and addition of condensed silica fume. Also, freeze-thaw resistance of FRC was considerably improved in comparison to conventional mortar.

1. 서 론

최근 각종 구조물의 경량 고강도화와 품질의 고도화에 수반하여 고성능 고품질의 건축용 섬유 구조물의 개발 및 실용화가 국내외적으로 크게 주목받고 있다. 그 동안 각종 고분자 합성섬유가 건설 구조물에 적용되어 왔으나 많은 취약점이 지적되어 이들 재료의 성능을 획기적으로 향상시킬 수 있는 대체재료의 개발이 시급한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 최근 국내외에서 개발된 탄소섬유 및 유리섬유에 의한 경량 고강도이고역학적 성능 및 내구성이 우수한 CFRC 및 GFRC의 개발응용을 목적으로, 조강시멘트 및 Silica Powder와 Silica Fume를 사용한 경량 고강도 및 고인성의 CFRC 및 GFRC의 제조(연속섬유 및 속, 대, 포 사용) 및 성형을 위한 최적조건을 조사하고, 내충격성 및 한랭지에서 구조부재료의 적용을 위한 내동해성을 파악하였다.

2. 시험 개요

2.1 사용 재료

(1) 탄소섬유 및 유리섬유: CF와 GF는 연속섬유 및 속(Tow), 대(Belt), 포(Cloth)의 형태로 사용하였

으며, CF는 KOSKA(주)제품의 PAN계 탄소섬유 및 Kureha(주)제품의 Pitch계 탄소섬유를 사용하였으며, 그 물성은 Table.1과 같다. 또한 GF는 Asahi사 제품의 내알칼리 유리섬유(비중 2.78, 인장강도 250 kg/mm², 탄성계수 7,000 kg/mm²)을 사용하였다.

(2) 시멘트 및 골재: 시멘트는 S사 제품의 조강포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 그 품질은 Table.2와 같다. 또 골재로는 K사 제품의 Silica Powder(특급 4호)를 사용하였고, 비교 검토용으로 남아프리카 A사 제품의 초미분말 Silica Fume를 사용하였으며, 그 품질은 Table.3과 같다.

(3) 혼화제: 고유동화제는 NP-10을 사용하였고, 증점제로 M사 제품의 Methyl Cellulose(점도 4,000 cps, 용해성: 열수분산)와 R사 제품의 Antifoam(Active defoamer: 30%, 비중 1.0)을 사용하였다.

2.2 배합 및 시험방법

(1) 배합 및 믹싱: 배합은 Table.4와 같이 하였고, 믹싱은 용량 30ℓ의 섬유분산용 Omni-Mixer를 사용하여, a) CFRC는 Dry blend: 30초, Primary blend: 3-5분, Secondary blend: 4.5-6.5분으로 약 10분간 혼합하였고, b) GFRC는 Primary blend: 2-2.5분, Secondary blend: 2-3.5분으로 약 5분간 혼합하였다.

(2) 시험방법

CF 및 GFRC의 휨강도 측정은 JIS R 5201에 준하

* 충남대학교 공과대학 토목공학과 교수

** 충남대학교 대학원 토목공학과 박사과정

*** 충남대학교 대학원 토목공학과 석사과정

Table 1. Properties of Carbon Fiber

| Type of fiber | Fiber diameter (10 ⁻³ mm) | Specific gravity | Tensile strength (kg/cm ²) | Modulus of elasticity (10 ³ kg/cm ²) | Elongation (%) |
|--------------------------|--------------------------------------|------------------|--|---|----------------|
| Pitch-based carbon fiber | 14.5 | 1.63 | 7,800 | 3.8 | 2.1 |
| Pan-based carbon fiber | 6.8 | 1.78 | 35,000 | 23.0 | 1.6 |

Table 2. Properties of Early Strength Cement

| Specific Gravity | Blaine (cm ² /g) | Setting Time | | Compressive Strength (kg/cm ²) | | | | |
|----------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------|--|---------------------|-------------|----------------------|-----------------------|
| | | Initial (hr : min) | Final (hr : min) | 1 ds | 3 ds | 7 ds | 28 ds | |
| 3.15 | 4,500 | 3 : 20 | 5 : 20 | 197 | 338 | 373 | 448 | |
| SiO ₂ (%) | Al ₂ O ₃ (%) | Fe ₂ O ₃ (%) | CaO (%) | MgO (%) | SO ₃ (%) | lg loss (%) | K ₂ O (%) | Na ₂ O (%) |
| 19.2 | 5.9 | 2.8 | 61.7 | 3.6 | 4.2 | 1.37 | 1.08 | 0.15 |

Table 3. Properties of Aggregates

| Name of Aggregate | Chemical Components (%) | | | Physical Properties | |
|-------------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------|--------------------------------|
| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | Specific Gravity | Particle Size |
| Silica Powder | 99.5 | 0.01 | 0.01 | 2.60 | Less than 0.15 mm (Aver. 7 μm) |
| Silica Fume | 89.0 | 1.81 | 2.45 | 2.21 | Average 1.36 μm |

Table 4. Mix Proportions of Cement Matrices for CFRC

| W/C (%) | S/C | Unit Weight (kg/m ³) | | | |
|---------|------|----------------------------------|--------|---------------|------------|
| | | Water | Cement | Silica Powder | Admixtures |
| 35.0 | 0.10 | 4.77 | 136.3 | 136.3 | S.P. 7.6 |
| 45.0 | 0.25 | 5.02 | 111.6 | 27.9 | 11.2 |
| 50.0 | 0.50 | 4.78 | 95.5 | 47.8 | 9.6 |
| 55.0 | 0.50 | 5.02 | 71.2 | 45.6 | 9.1 |
| 110.0 | 0.70 | 6.53 | 59.4 | 41.6 | 5.9 |

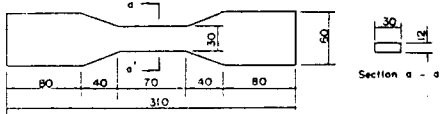


Fig. 1(a) Shapes and Dimensions of Test Specimens for Direct Tensile Strength

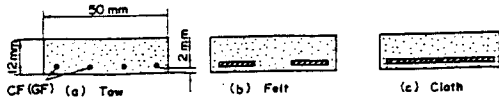


Fig. 1(b) Shape and Dimensions of Test Specimen

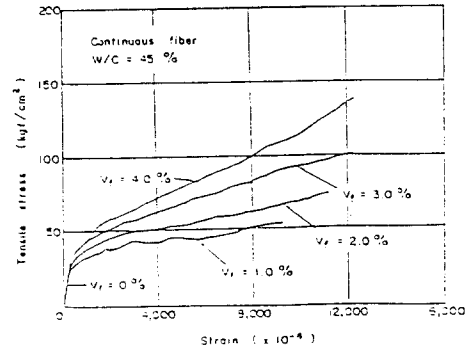


Fig. 2. Tensile Stress - Strain Curves for CFRC

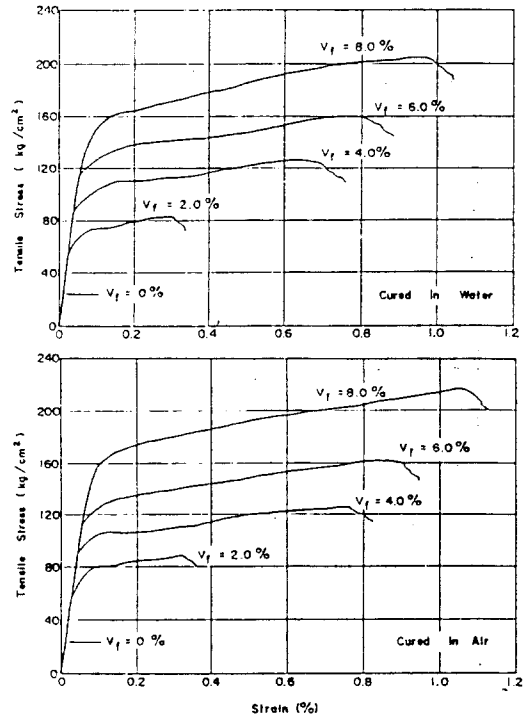


Fig. 3. Tensile Stress - Strain Curves of GFRC with Continuous Glass Fiber

여 4x4x16cm의 각주공시체를 제조하여 재령별, 양생조건별로 중앙집중재하시험에 의해 측정하였고, 인장응력-변형률관계를 측정하기 위하여 Fig. 1과 같은 직접인장공시체를 제조해 공시체 중앙부분 양면에 길이 30mm Wire Strain Gage를 부착해 양생조건별로 재령 28일의 조건에서 용량 10ton Instron을 사용하여 X-Y recorder에 의하여 하중-변형곡선을 측정하였으며, 또한 휨응력-처짐관계를 확인하기 위하여 5x1.2x50cm(bxtxL)의 휨공시체를 제조하여 공시체 중앙부 상하면과 측면에 Wire Strain gage(길이:30mm)를 부착하여 재령 28일에서 용량 100ton의 UTM을 사용하여 3등분점 재하에 의한 하중-처짐곡선을 recorder로 구하였다. 또한 CF 및 GFRC의 내동해성을 파악하기 위해 섬유 종류 및 혼입율, 골재의 종류, 양생방법을 요인으로 ASTM C 666-2의 동결융해 시험방법에 준하여 76x76x406mm의 공시체를 제조하여 -18°C - +10°C에서 1일 6-8cycle로 300cycle까지 시험을 행하였는데, 측정은 공시체의 질량과 1차 공명주파수의 변화를 조사하고 표면상태를 고찰하였다.

(3) 양생방법 및 시험재령

공시체의 양생은 CFRC의 경우 기건양생 및 Autoclave양생으로 하였고, GFRC의 경우 수중 및 기건양생으로 하였으며, 공시체 성형후 재령 24시간에서 탈형한 후, a) 기건양생은 23±2°C, 60±5% RH의 조건에서 b) Autoclave양생은 최고온도 180°C (10기압)에서 5시간으로 하여 양생을 종료한 후 23±2°C, 60±5% RH의 조건에서 c) 수중양생은 공시체 탈형 후 재령 7일까지 20°C 수중양생 후 23±2°C, 60±5% RH의 조건에서 양생하였다. 또한 공시체의 재령은 종류에 따라 차이가 있으나 휨강도의 공시체는 재령 3일, 7일, 28일, 180일, 365일로 하였고, 인장응력-변형률 및 휨응력-처짐 측정용 공시체, 동결융해 시험용 공시체는 모두 재령 28일로 하였다.

3. 시험 결과에 대한 고찰

3.1 CF·GFRC의 인장응력-변형률 관계

조강시멘트를 사용한 경우 PAN계 CF연속섬유를 사용한 CFRC 직접인장시험에 의한 인장응력-변형률 관계는 Fig. 2와 같다. 시험결과, 인장응력-변형률관계곡선은 일반적으로 섬유혼입율증가에 수반하여 초기에는 직선적인 단계를 거쳐 비탄성적

성상으로 변화하고, 인장파괴시의 변형율은 시멘트 매트릭스의 약 30-40배(9,000-11,000x10⁻⁶)의 연성적 성질을 나타내어 σ_t - ϵ 곡선은 bi-linear에 근사하게 됨을 알 수 있으며, 최대인장응력시의 변형율 ϵ_{tmax} 은 일정한 혼입율이상에서는 급격히 증대하여 W/C=50%, V_f=2%의 시멘트 매트릭스의 경우 대략 10,000x10⁻⁶전후의 값을 나타내었다. 또한 GFRC의 경우 재령 28일, 기건 및 수중양생의 조건하에서 섬유혼입율별 인장응력-변형률곡선은 Fig. 3과 같으며, 파괴응력은 GF혼입량 증대와 함께 증가하고, 인장강도 및 신장능력, 인장변형도 GF의 혼입량증대에 수반하여 현저히 증대하였고, V_f=8.0%의 경우 순간인장강도는 230 kg/cm²의 높은 응력과 변형율을 나타내었다.

3.2 CF·GFRC의 휨강도 특성

연속섬유를 속(Tow), 대(Belt), 포(Cloth)형태의 3종류 섬유를 사용해 섬유혼입량에 따른 휨강도는 Fig. 4와 같다. 시험결과, 섬유혼입량이 증가함에 따라 휨강도는 증가하는 경향을 나타내었으며, PAN계 CF의 경우가 Pitch계 CF를 사용한 경우보다 휨강도가 크게 나타났고, Pitch계 CF의 경우 섬유혼입율이 적은 범위에서는 섬유형태와 관계없이 휨강도는 대략 비슷한 값을 나타내었는데 이는 섬유의 절단에 의해 휨인장파괴가 일어나기 때문으로 판단되며, 섬유형태로는 PAN계 CF의 경우 포(Cloth), 속(Tow), 대(Belt)의 순으로, Pitch계 CF의 경우는 대(Belt)를 사용한 경우 가장 우수한 휨강도를 나타내었는데, 이 경우 속 및 대는 전단파괴되고 포는 박리에 의한 파괴형태를 나타내었으며, 섬유를 0.25-0.5%혼입하면 약 180kg/cm²이상의 휨강도를 얻을 수 있음이 확인되었다. 또한 파괴 휨모멘트와 섬유혼입율과의 관계는 Fig. 5에 나타낸바와 같이 PAN계 CF를 사용한 경우 실측값은 V_f=5%까지는 섬유혼입율증가에 따라 GF 및 Pitch계 CF를 사용한 경우보다 현저한 증가경향을 보였으나 V_f=0.5%이상에서는 증가율이 현저히 감소하는 경향을 보였다. 한편, 골재에 의한 영향으로서는 입경이 큰 골재를 사용하면 CF와 매트릭스의 접점은 극히 적어 상당량의 간극이 존재하게 되어 저응력에서 파괴를 일으켜 휨강도가 현저히 저하하는 경향을 나타내었으나, 입경이 극히 미세한 Silica Fume을 혼입한 경우 증점효과 및 섬유의 본산작용이 현저하여 매우 우수한 유동성 및 성형성은 물론 매트릭스 자체가

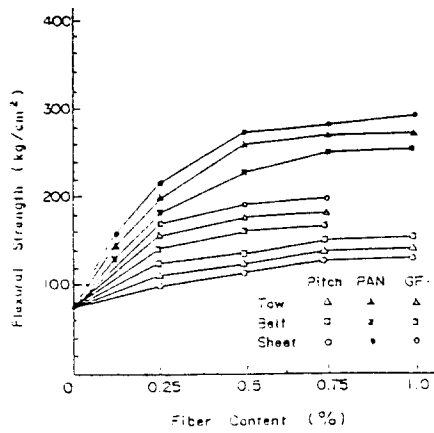


Fig. 4. Relationship between Flexural Strength and Fiber Content

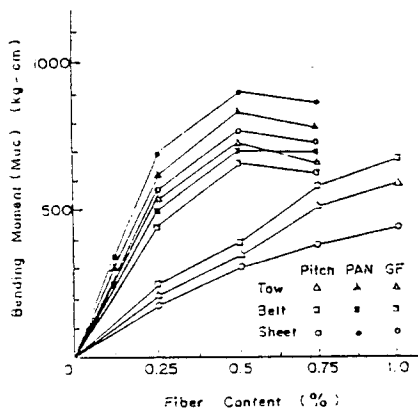


Fig. 5. Relationship between Bending Moment and Fiber Content

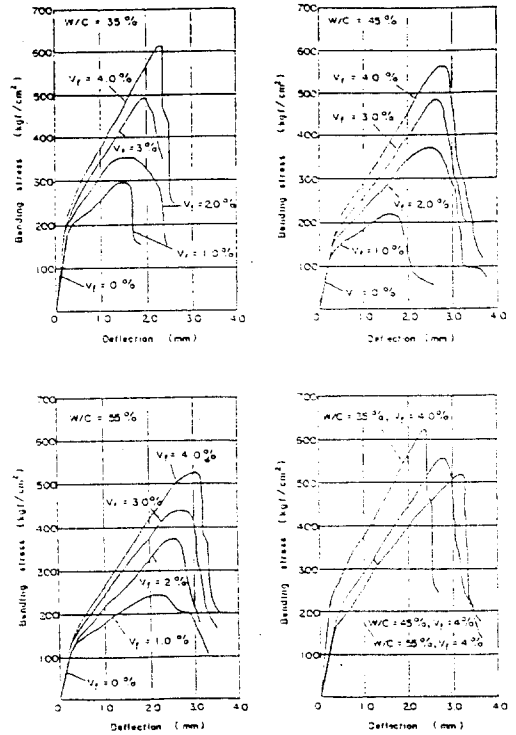


Fig. 6. Bending Stress - Deflection Curves for CFRC with One-direction Aligned Continuous Fiber

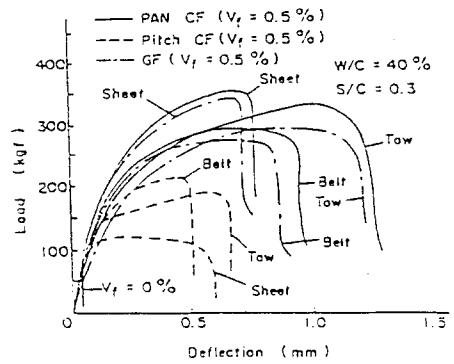


Fig. 7. Relationship between Load and Deflection Curves

밀실해지계 되므로 약 25-30%의 휨강도 증진효과를 나타내어 소요의 양호한 워커빌리티와 고강도 CFRC 제조를 위한 골재의 최적입경은 수심-200 μ m 정도, 감수제 첨가율은 3-6% 정도인 것으로 판단된다.

3.3 CF·GFRC의 휨응력-처짐특성

CFRC(FL. 10mm)의 휨응력-처짐특성의 관계를 확인하기 위하여 5x1.2x50cm(bxtxL) 휨공시체를 제조하여 중앙집중재하시험에 의한 시험결과는 Fig.6과 같다. 기건양생, 수중양생 및 Autoclave 양생의 순으로, 그리고 섬유혼입을 증대에 수반하여 높은 휨인성을 나타내었다. 또한 섬유형태에 따른 시멘트 복합체의 처짐특성은 Fig.7에 나타난 바와 같이 PAN계 CF를 사용한 경우가 GF 및 Pitch계 CF를 사용한 경우에 비하여 전반적으로 휨인성은 월등히 우수함을 알 수 있고, 최대하중까지의 처짐량을 비교하면 속-대-포의 순으로 처짐량이 크게 나타나서 처짐변형을 기대하는 경우는 속(Tow)으로 사용함이 유효한 것으로 판단된다. 또한 PAN계의 경우 GF양의 약90%, Pitch계 CF량의 60%정도에서 최대하중 및 그 점의 처짐량은 큰 값을 나타내었는데, 이는 섬유의 강도가 PAN계 CF의 경우가 월등히 높기때문인 것으로 판단되며, 연속섬유의 형태로서는 대 및 포에 비하여 작업성, 파괴성상 및 처짐변형이 우수한 속(Tow)의 형태로 사용함이 바람직한 것으로 판단된다.

3.4 CFRC의 동결융해 저항성

한랭지에 있어 CFRC의 육외부재료의 개발응용을 위한 내동해성을 파악하기 위하여 골재의 종류, 양생조건에 따른 동결융해 저항성 시험결과는 Fig.8,9 같다. 시험결과 Silica Powder를 사용한 경우의 질량감소는 5%이하로 작고 상대동탄성계수는 95%이상의 우수한 내동해성을 나타내었다. 또한 Silica Fume를 혼입한 경우 Silica Powder에 비해 열화현상이 커 내동해성이 현저히 저하하였으나 일반적으로 동결융해 저항성의 개선에 유효하였는데, 시험배합결과 W/C비가 클수록 Scaling에 의한 열화현상이 크게 나타나 질량감소 및 상대동탄성계수의 저하현상이 현저하게 나타났으며, 또 Silica Fume 및 시멘트에 의한 S/C비가 클수록 내동해성은 크게 증가하여 S/C=0.3의 경우 기건양생시 약 8%의 질량감소 및 상대동탄성계수의 저하경향을 나타내었으나, S/C=0.1, 0.2의 경우는 300cycle이전에 파괴를 일으켰

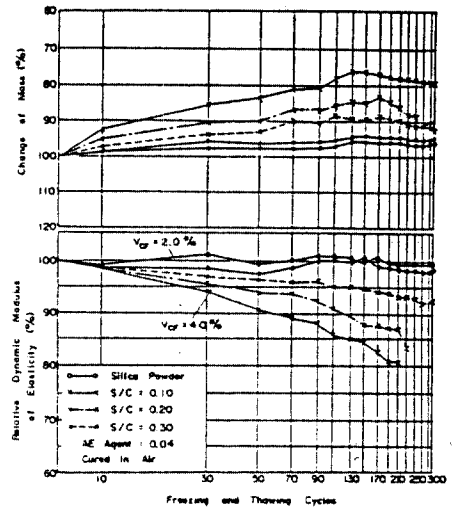


Fig. 8. Results of Freezing - Thawing Test of CFRC

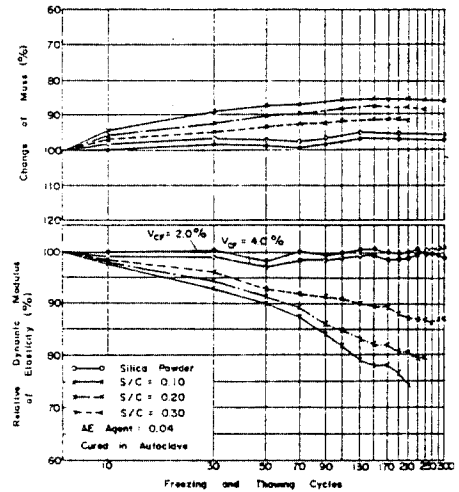


Fig. 9. Results of Freezing - Thawing Test of CFRC

고 질량감소율도 크게 증가하였다. 따라서 적당한 Silica Fume 혼입과 W/C비를 사용하면 입축, 인장, 휨강도 및 휨인성의 증대에 크게 유효한 것으로 판단된다. 또한 Silica Fume를 사용한 경우 기건양생시 Autoclave 양생에 비해 내동해성은 현저히

증가하였고, 또 섬유혼입에 의해서 내동해성은 현저히 증가하고 $V_f=2\%$ 의 경우 4%에 비해 다소 내동해성이 우수하였으나 섬유혼입을 변화에 의한 열화현상은 크게 나타나지 않았다.

4. 결 론

CFRC 및 GFRC의 동결융해 저항성과 섬유형태별 역학적 특성은 섬유관계요인, 믹싱관계요인 및 양생조건에 따라 크게 영향을 미치고 있음이 확인되었고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) CFRC의 인장응력-변형을 곡선은 섬유혼입을 증가에 수반하여 초기의 직선적 단계를 거쳐 비탄성적 성상으로 변화하여 인장파괴시의 변형율은 시멘트 매트릭스의 약 30-40배($9,000-11,000 \times 10^{-6}$)의 연성적 성질을 나타내어 bi-linear에 근사하게 되었고, 최대인장응력시의 변형율은 $W/C=50\%$, $V_f=2\%$ 의 경우 약 $10,000 \times 10^{-6}$ 전후의 값을 나타내었다. 또한 GFRC의 경우 GF 혼입량 증가에 수반하여 파괴응력, 인장강도, 신장능력 및 인장변형은 현저히 증대하여 $V_f=8\%$ 의 경우 순인장강도는 230 kg/cm^2 의 높은 응력 및 변형율을 나타내었다.

(2) 섬유형태별 휨강도는 섬유혼입량증대에 따라 증가하였고, PAN계 CF의 경우가 GF, Pitch계 CF에 비하여 높은 값을 나타내었으며 PAN계 CF의 경우 포-속-대의 순으로, 그리고 Pitch계 CF의 경우에는 대의 경우가 가장 우수한 휨강도를 나타내었는데 $V_f=0.25-0.5\%$ 혼입하면 약 180 kg/cm^2 이상의 높은 값을 나타내었다. 또한 파괴휨모멘트는 PAN계 CF의 경우 $V_f=5\%$ 까지는 섬유혼입율이 증가함에 따라 GF, Pitch계 CF에 비해 현저히 증가하였으나 $V_f=5\%$ 이상에서는 감소현상을 나타내었다. 한편 골재에 따라서는 입경이 극히 미세한 Silica Fume를 혼입한 경우 증점효과 및 섬유의 본산성이 현저하여 매우 우수한 유동성 및 성형성은 물론 매트릭스 자체가 밀실해져서 약 25-30%의 휨강도 증진효과를 나타내었다.

(3) CFRC의 휨응력-처짐곡선 시험결과, 기건양생, 수중양생 및 Autoclave양생의 순으로, 그리고 섬유혼입을 증대에 수반하여 높은 휨인성을 나타내었고, 또한 섬유형태에 따라서는 PAN계 CF의 경우 GF, Pitch계 CF에 비해 휨인성은 월등히 우수하였

고, 최대하중까지의 처짐량은 속-대-포의 순으로 크게 나타났다. 또한 PAN계의 경우 GF량의 약 90%, Pitch계 CF량의 60% 정도에서 최대하중 및 그 점에서의 처짐량이 큰 값을 나타내었다.

(4) 동결융해 저항성 시험결과, Silica Powder를 사용한 경우 질량감소는 5% 이하로 작고 상대동탄성계수는 95% 이상의 우수한 내동해성을 나타내었다. 또한 Silica Fume를 혼입한 경우 Silica Powder에 비해 열화현상이 커 내동해성은 저하하였으나 일반적으로 동결융해 저항성의 개선에 유효하였고, 시험배합결과 W/C 비가 작을수록 그리고 S/C 비가 클수록 열화현상이 적게 나타나 질량감소를 및 상대동탄성계수 저하가 현저히 감소하였으며, S/C 비가 0.1, 0.2의 경우 300cycle 이전에 파괴를 일으켰다. 그리고 Silica Fume 혼입시 기건양생의 경우 Autoclave 양생에 비해 내동해성은 크게 증가하였고 섬유혼입을 변화에 의해서는 큰 차이를 나타내지 않았으므로, 적당한 S/C 비 및 W/C 비를 사용하고 양생시 습윤조건에 유의하면 압축, 인장, 휨강도 및 휨인성과 내동해성 증가에 크게 유효한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. S. B. Park, B. S. Rhee, "Experimental Study on the Development and Application of CFRC of High Strength", J. of Korean Society of Composites Materials, Vol. 1, No. 1, pp. 34-42, 1988
2. S. B. Park, "Experimental Study on the Engineering Properties of Carbon Fiber Reinforced Cement Composites", J. of KCI, Vol. 1, No. 1, pp. 95-104, 1989