

## 유기 및 무기 섬유로 보강한 포트랜드 시멘트의 물성 연구

장복기<sup>†</sup> · 김윤주\*

전남대학교 신소재공학부

\*동신대학교 신소재공학부

(2004년 6월 16일 접수; 2004년 7월 31일 승인)

### Physical Properties of Organic- and Inorganic-Fiber Reinforced Portlandcement

Pok-Kie Chang<sup>†</sup> and Yun Ju Kim\*

Department of Materials Science and Engineering, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

\*Department of Materials Science and Engineering, Dongshin University, Naju 520-714, Korea

(Received June 16, 2004; Accepted July 31, 2004)

#### 초 록

본 연구에서는 무기(강, 아스베스트와 카본) 및 유기(폴리아크릴과 폴리아마이드) 섬유가 포트랜드 시멘트의 물성 보강에 미치는 영향을 조사하였다. 각 시편의 하중-변형 관계도로부터 굽힘강도, 탄성계수, 파괴에너지 및 파괴인성 값을 구하여 서로 비교하였다. 그리고 따로 충격에너지 실험도 수행하였으며 파괴에너지와 비교하였다. 휨강도 개선에는 무기(아스베스트) 섬유보강이 가장 효과적이었으며, 충격에너지의 보강섬유로는 유기(폴리아크릴) 섬유가 가장 좋았다. 한편 강 섬유는 휨강도와 충격에너지 양자를 동시에 보강하는 데에 가장 적합했다. 또한 강 섬유는 모든 섬유 중에서 가장 높은 파괴에너지와 파괴인성 값을 나타내었다.

#### ABSTRACT

In this study, inorganic (steel, asbestos and carbon) and organic (polyacryl and polyamide) fibers were used to investigate their reinforcing effects of the physical properties of Portland cement. From the load-displacement curve of each reinforced specimen, fracture strength, Young's module, fracture energy and fracture toughness were computed and compared with each other. In addition, the experiment of their impact toughness was carried out and compared with the fracture energy. For the improvement of fracture strength, the inorganic (asbestos) fiber reinforcement was most effective, while the best reinforcing effect of impact toughness was achieved by organic (polyacryl) fiber. And steel fiber proved to be most adequate for improvement of both fracture strength and impact toughness. Steel fiber also showed the highest fracture energy and fracture toughness among all of the fibers.

**Key words :** Fiber reinforcement, Portland cement, Organic and inorganic fibers, Load-displacement curves, Impact toughness

#### 1. 서 론

포트랜드 시멘트(이하 '시멘트'로 칭함)도 여타의 세라믹 재료와 마찬가지로 취약(brittle)하여, 이를 개선하고자 섬유로 보강하는 연구들이 많이 수행되고 있다.<sup>1-6)</sup> 한편 시멘트는 다른 세라믹 재료와 달리 유기 섬유로도 보강이 가능한 이점이 있다.<sup>7,8)</sup> 그러나 유기 및 무기 섬유의 특성에 큰 차이가 있으므로, 사용한 섬유의 종류, 즉 유기 또는 무기 여하에 따라 시멘트의 물성도 크게 다를 것으로 예상된다.

섬유보강 시멘트에 관한 연구는 많으나, 유기 및 무기 섬유보강의 차이를 상대적으로 비교 연구한 사례는 아직

없다. 그래서 본 연구에서는 유기와 무기(금속 및 세라믹) 섬유로 보강한 시멘트의 물성 차이를 서로 비교적으로 고찰하는 실험을 수행하였다. 연구실험 섬유는 실제 및 연구에서 많이 사용되고 보강효과가 크다고 생각되는 것들 중에서 선택하였다.

일정량의 유기 및 무기 섬유를 함유한 시멘트 시편(경화체)을 제조하고 이 시편들을 40일간 수중양생한 다음 만능재료시험기로 하중-변형 관계도를 구하였다. 이 관계도로부터 굽힘강도, 탄성계수, 파괴에너지 및 파괴인성을 구하여 서로 비교하였다. 또 충격시험을 통하여 충격인성 (impact toughness)을 구하였고, 굽힘강도에 대한 Weibull 모듈(m)을 구하여 섬유혼합에 따른 물성의 신뢰도 변화 여부를 고찰하였다. 결과적으로, 유기 및 무기 섬유보강의 차이를 확인하고 이에 따른 적합한 용도의 방향을 제시하고자 하였다.

<sup>†</sup>Corresponding author : Pok-Kie Chang  
E-mail : pkchang@chonnam.ac.kr  
Tel : +82-62-530-1706 Fax : +82-62-530-1699

2. 실험 방법

2.1. 원료

본 연구에서 사용한 섬유는 유기 섬유로서 polyacryl (PAN, polyacrylnitril계)과 polyamide 섬유 그리고 무기 섬유로서 asbestos(chrysotil), 강(steel) 및 carbon(PAN계) 섬유였으며, 이들 섬유의 물성을 Table 1에 나타내었다. asbestos 섬유는 해숙이 잘 안되어 실제 사용한 섬유 두께는 약 1µm 정도였다. 그리고 원료 시멘트는 시판 중의 1종 보통 포트랜드 시멘트를 사용하였다.

2.2. 시편제조

4·16·4 cm<sup>3</sup>의 몰드를 사용하여 4·16·Xcm<sup>3</sup> 크기의 시편을 제조하였다(Table 2). 이 몰드의 밑부분에 시멘트-섬유 슬러리를 가지고 가압성형을 할 수 있도록, 구멍 크기가 다른 4개의 필터들을 중첩해 두었고, 이를 다시 진공펌프에 연결하였다. Table 2의 원료 혼합비에 따라, 먼저 1.2 cm 길이의 섬유를 물에 충분히 분산시킨 다음 여기에 시멘트를 가하여 혼합기(KS L 5109)에서 5분 동안 혼합하였다. 각 시편 슬러리의 용적은 57 cm<sup>3</sup>이었고 이 중 고형성분은 22.2 cm<sup>3</sup>으로 일정하게 하였다. 22.2 cm<sup>3</sup>은 시멘트 70 g의 체적이며, 57 cm<sup>3</sup>은 시멘트 70 g을 W/C(물:시멘트 비)=0.50의 물과 혼합하여 만들어진 슬러리

의 체적이다. Table 2의 시편 1('cement')은 순수한 시멘트 슬러리(시편)이고, 시편 2(standard probe)는 asbestos 섬유(시멘트의 5%)를 혼합한 시멘트 시편이며, 시편 3부터 시편 8까지는 asbestos 섬유 5% 이외에 각 해당 섬유를 10%씩 함유한 시편들이다. 그리고 Table 2의 W/C와 thickness는 가압성형한 생시편의 최종 함수량과 두께를 나타낸다.

물이 적당히 제거된 후에는 시편 위에 몰드 밑면 크기의 금속판을 올려놓고 15 MPa의 압력으로 가압성형하였다. 이렇게 성형한 시편들은 섬유의 종류에 따라 시편 두께에 다소 차이(5.26~6.70 mm)를 보였으며 시편들의 함수량(W/C) 역시 각기 달랐다(Table 2 참조). 시편들은 몰드에 들어있는 상태로 밀폐된 용기에 1일 동안 양생한 다음 탈형하여 22°C의 수중에 40일간 보관하였다.

2.3. 실험방법

위와 같이 40일간 수중양생한 시편에 대하여 Tonindustrie사의 만능재료시험기(Bauform 2650)를 이용하여 MOR(modulus of rupture, 3점 굽힘강도) 측정법으로 하중-변형 관계를 조사하였다.

하중-변형 관계도로부터 각 시편의 굽힘강도와 탄성계수를 구하였는데, 탄성계수는 50 N의 가압(P) 시 생긴 변형(굽힘)으로부터 계산하였다. 그리고 굽힘강도에 대해서

Table 1. Properties of Raw Materials

| Raw mat.    | E-module (GPa)        | Diameter (µm) | Density (g/cm <sup>3</sup> ) | Fracture strength (MPa) | Fracture extension (% , dry) |
|-------------|-----------------------|---------------|------------------------------|-------------------------|------------------------------|
| 1 Cement    | 15 - 20 <sup>1)</sup> | -             | 3.15                         | 4 - 5 <sup>1)</sup>     | 0.03 <sup>2)</sup>           |
| 2 Polyacryl | 7.0                   | 43            | 1.15                         | 390 - 430               | 18 - 25                      |
| 3 Polyamide | 2.4                   | 49            | 1.15                         | 460 - 660               | 26 - 40                      |
| 4 Carbon    | 200                   | 8             | 1.71                         | 2,250                   | 1.1                          |
| 5 Asbestos  | 170                   | ~1            | 2.50                         | 560 - 750               | 1.5                          |
| 6 Steel     | 200                   | 40 - 50       | 7.80                         | 1,100                   | 7.0                          |

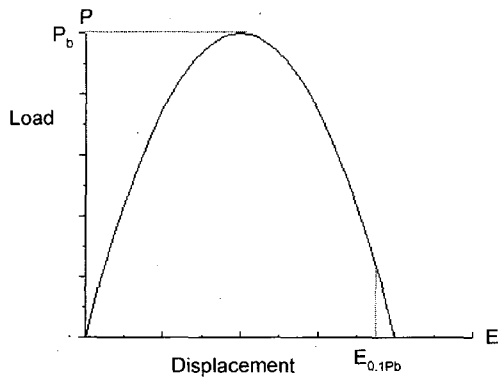
<sup>1)</sup>Value of fully hydrated cement paste of w/c=0.40

<sup>2)</sup>Tensile

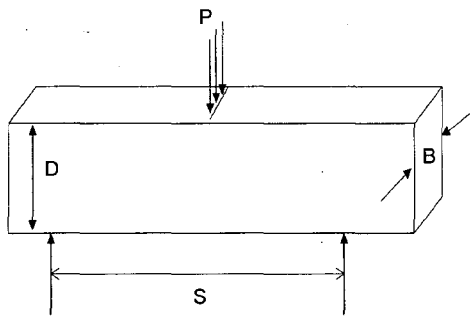
Table 2. Batch Composition and Properties of the Specimens

| Specimen    | Content of solid component <sup>1)</sup> |        |       | W/C  | Thickness (mm) |
|-------------|--|--------|-------|------|----------------|
|             | Cement(C)                                | Asbest | Fiber |      |                |
| 1 Cement    | 1  | 0      | 0     | 0.27 | 6.45           |
| 2 Standard  | 1  | 0.05C  | 0     | 0.17 | 5.26           |
| 3 Polyacryl |  |        |       | 0.23 | 5.63           |
| 4 Polyamide |  |        |       | 0.23 | 5.67           |
| 5 Carbon    | 1  | 0.05C  | 0.10C | 0.34 | 6.70           |
| 6 Asbest    |  |        |       | 0.21 | 5.50           |
| 7 Steel     |  |        |       | 0.27 | 6.03           |

<sup>1)</sup>Slip of 57 cm<sup>3</sup> was used for each specimen, the total solid volume of which was 22.2 cm<sup>3</sup> equal to the volume of 70 g cement.



(a)



(b)

Fig. 1. Schematic illustration of load-displacement behavior of fracture specimen (a) and specimen for fracture strength measurement (b).

는, 섬유보강 시의 재료(물성) 신뢰성을 알아보기 위하여, Weibull 모듈(m)을 조사하였다.

또 Fig. 1에 도시한 바와 같이 하중-변형 관계도로부터 다음의 식에 따라 각 시편의 파괴에너지( $G_{Ic}$ )와 파괴인성( $K_{Ic}$ )값을 구하였다:

$$G_{Ic} = (BD)^{-1} \int P(\epsilon) \cdot d\epsilon,$$

$$K_{Ic}^2 = (G_{Ic} \cdot E)$$

( $\int P(\epsilon)d\epsilon$ 는  $\epsilon = 0 \sim P_{10\%}$ 까지의 적분 값)

또 각 시편에 대하여 Zwick사의 진자충격기(Pendelschlagwerk, Typ 5102)로 충격인성 시험을 수행하였다. 여기서

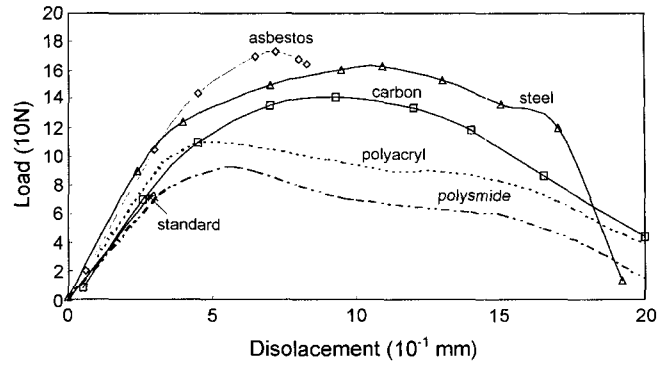


Fig. 2. Load-displacement curves for the samples.

충격인성은 시편의 단면적당 충격에너지( $J/m^2$ )로 표현되는 값으로서 파괴에너지와 같은 단위이며, 따라서 두 방법으로 얻은 측정결과를 서로 비교할 수 있다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 굽힘강도와 탄성계수

Fig. 2에 따라 계산하여 구한 굽힘강도와 탄성계수를 Table 3에 나타내었다. 시편 2에서 시편 8까지는 모든 시편이 다 asbestos 5%를 함유하고 있으므로 asbestos 5%만 함유한 시편 2('standard')를 기준으로 비교하면, 유기 섬유첨가로 굽힘강도 값은 약간 증가하며 무기 섬유에 의해서는 큰 증가를 나타낸다. 이는 보강섬유들 자체의 굽힘강도 차이에 기인한다고 볼 수 있다. 한편 탄성계수는 유기 섬유의 경우 표준시편보다 오히려 작고 무기 섬유의 경우는 비슷하거나 크다.

Table 3을 보면, carbon 섬유로 보강한 시편의 탄성계수가 의외로 작은 값을 보여주고 있다. Carbon 섬유가 아주 높은 탄성계수 값(Table 1)을 갖고 있기 때문에 다른 무기 섬유와 마찬가지로 당연히 큰 보강효과를 나타내야 맞다. 그런데도 이러한 이상 결과를 나타낸 데는, Table 2의 W/C나 'thickness'에서 보는 것처럼, 시편에 구조적 결함들이 있는 때문으로 보인다. 실제로 carbon 섬유는 시편

Table 3. Physical Properties of the Specimens (1)

| Specimen    | Load at fracture (N) | Fracture strength (MPa) | Displacement at P=50 N (mm) | E-module (GPa) |
|-------------|----------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------|
| 1 Cement    | 52                   | 5.6                     | 0.116                       | 17.1           |
| 2 Standard  | 74                   | 12.1                    | 0.202                       | 18.3           |
| 3 Polyacryl | 111                  | 15.8                    | 0.187                       | 16.2           |
| 4 Polyamide | 93                   | 13.0                    | 0.226                       | 13.1           |
| 5 Carbon    | 142                  | 14.2                    | 0.172                       | 10.4           |
| 6 Asbest    | 173                  | 25.7                    | 0.147                       | 22.1           |
| 7 Steel     | 165                  | 20.4                    | 0.134                       | 18.3           |

트 슬러리에서 혼합이 잘 안되어 자기들끼리 한 방향으로 서로 뭉쳐서 속을 이루며 matrix(시멘트 슬러리)와의 재료분리가 심하게 일어나 섬유가 균일하게 분포된 시편을 얻기가 힘들었다. 그 결과 W/C와 thickness가 상대적으로 큰 값을 갖는 것이라 사료되며, 이러한 재료분리의 정도를 완화시키기 위하여 혼합수에 0.1 wt%의 methylcellulose를 첨가하였었다. 그리고 carbon 섬유와 matrix 계면 사이의 약한 결합력<sup>6)</sup>도 굽힘강도 및 탄성계수 값이 낮은 이유라 사료된다. Carbon 섬유보강 시편에서는 시편이 부러질 때 특히 섬유가 길게 빠져나오는 경향(pull-out)을 보였다.

Carbon 섬유에 의한 재료분리, 재료의 불균일성 문제는 굽힘강도에 대한 Weibull 모듈(m)의 시험에서도 확인 할 수 있다. Fig. 3에 나타난 결과를 보면, m 값이 시멘트(matrix, 9.9) > asbestos(7.5) > carbon(6.1)의 순이다. 또 각 시편의 굽힘강도 값을 보면, 시멘트 5.6 ± 16%(MPa), asbestos 25.7 ± 19% 그리고 carbon 14.2 ± 26%로 carbon 섬유시편의 경우 오차범위가 컸다. 즉 carbon 섬유의 경우 재료분리로 인하여 강도 자체가 작을 뿐만 아니라 이 작은 강도값의 신뢰도 역시 낮게 나타나는 것이라 사료된다.

위의 실험 결과를 보면, 굽힘강도와 탄성계수 값이 상대적으로 작은 유기 섬유에 의해서는 시멘트 경화체의 강도보강을 기대할 수가 없다.

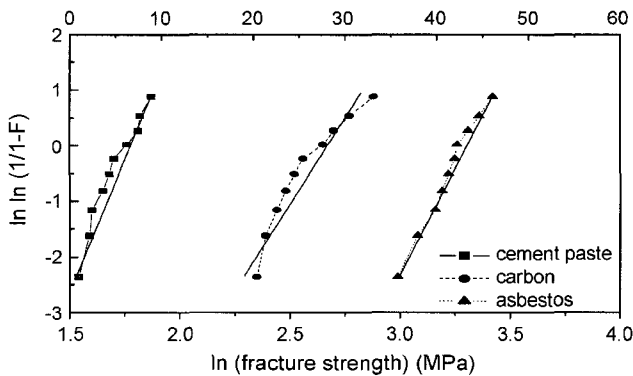


Fig. 3. Weibull modules obtained from the fracture strength measurements.

### 3.2. 파괴에너지와 파괴인성

Fig. 2에 도시한 바와 같이, 일단 부러뜨려진 matrix는 인장성(fracture extension, Table 1 참조)이 좋은 섬유를 매개로 아직 서로 결합되어 있으며 부러진 파편이 완전히 분리되기까지 더 이상의 힘이 요구된다. 그리고 이를 위하여 필요한 일(에너지, work of fracture)과 시편의 파괴하중(굽힘강도 시의 최대하중) 사이에는 일정한 관계가 없음을 알 수 있다.

Carbon 섬유의 경우는 인장성이 asbestos 섬유 이상으로 나쁜데도 불구하고 하중-변형 관계가 steel이나 유기 섬유의 경우와 유사하다. 이는, 3.1에서도 언급한 바와 같이, carbon 섬유와 시멘트(matrix) 사이의 계면결합이 열악하여 섬유가 '미끄럼'(slide) 현상을 나타내면서 부러진 파편을 계속 붙들고 있는 때문으로 보인다.

Table 4에 Fig. 2를 근거로 계산한 파괴에너지와 파괴인성 값을 나타내었다. Fig. 2에서 이미 예상한대로 파괴에너지는 굽힘강도와 달리 오히려 유기섬유 보강 시 훨씬 더 큰 값을 보여준다. 그리고 각 시편의 물성을 서로 비교하기 위하여 Fig. 4에 파괴에너지 및 파괴에너지로부터 계산한 파괴인성과 굽힘강도 값을 함께 도시하였다. 파괴에너지와 파괴인성은 steel과 polyacryl 섬유보강 시편에서

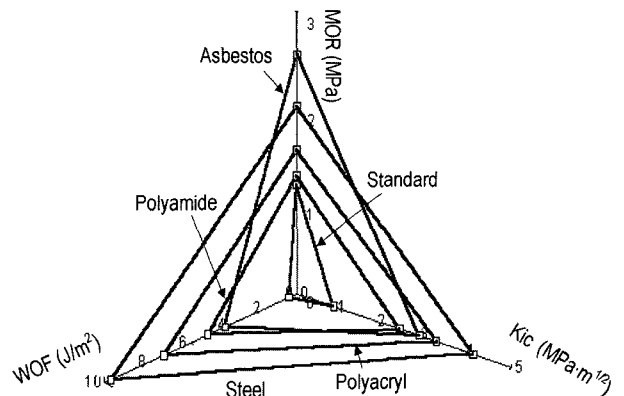


Fig. 4. Relation between fracture strength (MOR), fracture energy (WOF) and fracture toughness (Kic) for the samples.

Table 4. Physical Properties of the Specimens (2)

| Specimen | $\int P(\epsilon) \cdot d\epsilon$<br>(N · mm) | Fracture energy<br>(J/m <sup>2</sup> ) | Fracture toughness<br>(MPa · m <sup>1/2</sup> ) | Impact toughness<br>(kJ/m <sup>2</sup> ) |
|----------|--|--|---|--|
| 1        | Cement   | 3.38                                   | 13.1  | 0.09                                     |
| 2        | Standard                                       | 10.77                                  | 51.2  | 0.18                                     |
| 3        | Polyacryl                                      | 164.97                                 | 732.5   | 0.96                                     |
| 4        | Polyamide                                      | 116.25                                 | 512.6   | 0.44                                     |
| 5        | Carbon   | 202.44                                 | 755.4   | 0.63                                     |
| 6        | Asbest   | 92.84                                  | 422.0   | 0.58                                     |
| 7        | Steel  | 234.58                                 | 972.6   | 0.71                                     |

높게 나타나며, 이는 주로 이들 시편이 부러진 이후에 가해진 에너지( $\epsilon_{P_{max}}$ 에서부터  $\epsilon_{P=10\%}$ 까지의  $\int P(\epsilon) \cdot d\epsilon$ ) 값이 큰 데에 기인한다. 특히 steel 섬유시편은 굽힘강도/ $P_{max}$  값도 크고 시편이 부러진 이후의  $\int P(\epsilon) \cdot d\epsilon$  값도 유기 섬유(polyacryl)보강 시와 비슷하게 큰 값을 나타내었다. Steel 섬유는 그 물성이 무기(세라믹, 높은 굽힘강도)와 유기(큰 변형성) 섬유의 중간에 위치하여 두가지 장점이 나타낼 수 있는 효과를 보여준다.

3.3. 충격인성(Impact Toughness)

충격시험기로 측정한 충격인성의 결과를 Table 4에 나타내었다. 유기 섬유(polyacryl)로 보강한 시편이 제일 큰 값을 보였으며 그 다음은 steel 섬유 시편이었다.

충격시험기로 측정한 충격인성과 파괴에너지 값은 양자가 다 시편을 파괴하는 데에 필요한 일(에너지,  $J/m^2$ )로 표시된다. 충격인성은 충격적(동적)인 일이며 이에 비해 후자는 상대적으로 정적인 일이다. 서로 다른 방법으로

구한 두 에너지 값이 서로 어떠한 관계에 있는지를 Fig. 5에 도시하였다. Polyamide 섬유로 보강한 시편은 두가지 시험방법에서 거의 같은 값을 나타내며, asbestos와 polyacryl 경우는 충격인성 값이 파괴에너지 값보다 더 크게, 즉 상대적으로 동적인 파괴에 더 강하게 나타나 있다. 한편 carbon과 polyamide 섬유로 보강한 시편은 정적인 파괴요인에 더 강한 것으로 보인다.

섬유 보강시편의 굽힘강도와 충격인성을 비교하여 Fig. 6에 도시하였다. Fig. 6은 각각 최대의 굽힘강도와 충격인성 값을 갖는 시편(asbestos와 polyacryl)을 각각 100(%)으로 하고 여타의 시편들을 이와 비교한 것이다. Fig. 6을 보면, 섬유 보강의 목적에 따라 그에 적합한 섬유가 따로 있음을 쉽게 알 수 있다. 즉 큰 하중을 견지해야하는 시멘트 구조재료에는 asbestos나 steel 섬유가 좋고 기타 유기 섬유는 바람직하지 않다. 반대로 큰 충격을 잘 흡수해야하는, 즉 충격완화 작용이 크게 요구되는 구조에는 유기 섬유(polyacryl)보강이 오히려 바람직하다.

4. 결 론

유기 및 무기 섬유로 보강한 시멘트에 대하여 수행한 본 연구실험의 결과는 다음과 같다:

1. 일반적으로 굽힘강도의 보강에는 무기 섬유보강이 효과적이며 내충격성의 보강에는 반대로 유기 섬유보강이 효과적이다.
2. 세라믹 섬유(큰 탄성계수)와 유기 섬유(우수한 인장성)의 물성을 공유한 steel 섬유는 굽힘강도와 내충격성에 있어서 공히 양호한 결과를 나타내었다.
3. 파괴에너지 및 파괴인성은 steel 섬유보강 시편에서 가장 높게 나타났다.
4. 슈트나 적층 형태로 현재 콘크리트 보강에 많이 사용되고 있는 carbon섬유는 내충격성, 파괴에너지 및 파괴인성 보강에 있어서 유기(polyacryl)나 무기(steel) 섬유보다 못하였다.

REFERENCES

1. A. Bentur and S. Mindess, "Fiber-Reinforced Cementitious Composites," pp. 1-11, Elsevier Applied Science, London, 1990.
2. P. Curiger, "Glass Fiber Concrete(in Ger.)," *Concrete*, **44** [11] 660-63 (1994).
3. M. Schulz, "Glass Fibers: Properties and the Way of Effect(in Ger.)," *Concrete*, **50** [7] 382-87 (2000).
4. M. Schulz, "Steel Fibers: the Horizon of Use(in Ger.)," *Concrete*, **50** [8] 452-54 (2000).
5. K. H. Kwak, S. J. Cho, and I. S. Seok, "A Study of Fatigue Behavior of Two-Span Fiber Reinforced Concrete Beam," *J. Kor. Concr. Inst.*, **15** [2] 163-72 (2003).

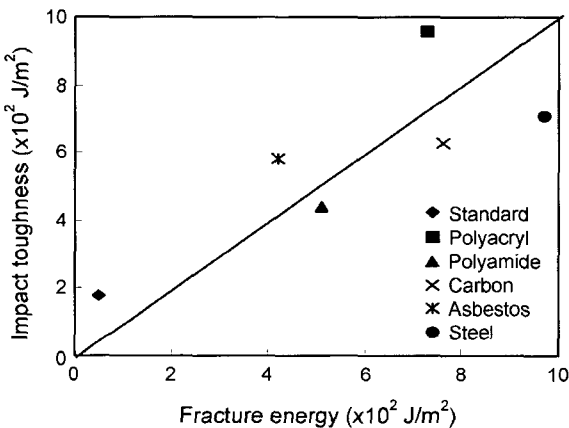


Fig. 5. Relation between fracture energy and impact toughness for the samples.

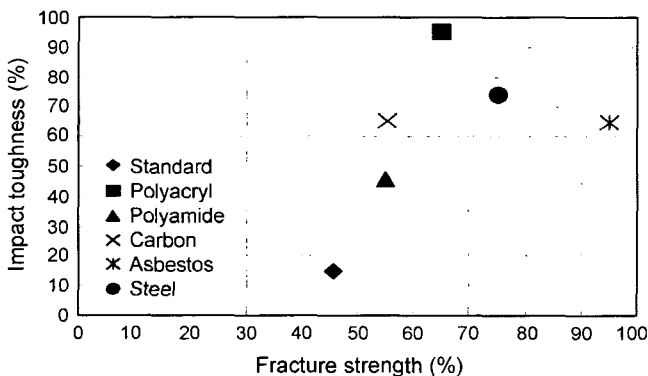


Fig. 6. Comparative illustration of fracture strength(MOR) and impact toughness(Iz) for the samples. The sample showing the highest value of MOR/Iz is denoted as 100(%)

6. H. D. Yun, S. Y. Sung, J. H. Oh, S. Y. Seo, and T. Y. Kim, "Bond Behavior between Parent Concrete and Carbon Fiber Mesh," *J. Kor. Concr. Inst.*, **15** [6] 769-77 (2003).
7. R. Coutts, "Wastepaper Fiber in Cement Products," *Intern. J. Cem. Compos. Lightw. Concr.*, **11** [3] 143-47 (1989).
8. J. P. Won, C. W. Back, C. G. Park, Y. Han, and B. L. Kim, "Pullout and Flexural Performance of Structural Synthetic Fibers by Geometry and Sectional Area Change," *J. Kor. Concr. Inst.*, **15** [5] 643-49 (2003).