터널과 지하공간, 한국암반공학회
Vol. 10, 2000, pp. 196~210

TUNNEL & UNDERGROUND Vol. 10, 2000, pp. 196-210
J. of Korean Society for Rock Mech.

강섬유 보강 숏크리트의 휨인성 평가 방법 연구

김 재 동[1] · 김 덕 영[2]

A study on the flexural toughness evaluation method of steel fiber reinforced shotcrete

Jaedong Kim and Deog Young Kim

ABSTRACT This study was aimed to verify the validity of the flexural toughness evaluation method of steel fiber reinforced shotcrete(SFRS) currently being adopted by Korea Highway Corporation(KHC). Total 33 beam specimens using six different kinds of steel fiber products were prepared at tunnel construction sites and flexural toughness tests were executed at laboratory. Equivalent flexural strengths and toughness quotients were evaluated from the tests following the KHC guide and these were compared with the quality grades determined under the guides proposed by ASTM, ITA and EFNARC. To discard the disadvantage that the toughness quotient could be influenced by flexural strength when following the KHC guide, a modification substituting the designed flexural strength for the flexural strength in the toughness quotient calculation formula was proposed to rate the quality of SFRS more adequately.

Key words : Steel fiber, Shotcrete, Flexural toughness, Equivalent flexural strength, Toughness quotient

초 록 본 연구는 현재 한국도로공사에서 시행하고 있는 강섬유보강 숏크리트(SFRS)의 휨인성 평가 방법에 대한 타당성을 검증하기 위하여 수행되었다. 시료는 6종류의 강섬유를 사용하여 33개의 삼등분점굴곡시험용 빔 블록을 현장 타설 후 양생한 후 절단, 제작하였으며, 휨인성시험은 실험실에서 실시하였다. 한국도로공사의 시험지침을 따라 등가휨강도 및 인성계수를 산정하였으며, 이 결과는 ASTM, ITA 및 EFNARC의 평가 기준을 적용한 결과와도 비교하였다.
연구 결과 한국도로공사 평가 방법에서는 인성계수가 휨강도의 영향에 의하여 평가 결과에 모호성이 있는 것으로 판단되었다. 이를 수정하기 위하여 인성계수의 계산에 적용되는 휨강도를 설계 시에 설정된 설계휨강도로 대체, 적용하는 방법이 보다 적절히 SFRS의 휨인성을 평가할 수 있는 것으로 판단된다.

핵심어 : 강섬유, 숏크리트, 휨인성, 등가휨강도, 인성계수

1. 서 론

인류가 이용하고 있는 각종 구조물들은 다양한 종류의 건설재료들로 이루어져 있으며 그 중 현재 가장 많이 사용되고 있는 건설재료는 콘크리트라고 할 수 있을 것이다. 그러나 콘크리트는 낮은 인장강도와 취성적 특성으로 인하여 건축물이나 구조물 등에 사용되었을 경우 내구성이나 안정성 등 필수적으로 요구되는 품질에서 취약성을 보이는 단점을 지니고 있다.

터널 시공에서 지보재로 널리 사용되고 있는 숏크리트의 경우 이러한 단점을 보강하기 위해서 주로 와이어메쉬(wire-mesh)를 사용하고 있으나 이로 인해 야기되는 문제점, 예를 들어 최적의 지보 설치시기에 시공 곤란, 공사기간의 지연 등으로 새로운 보강재의 개발이 요망되게 되었다. 강섬유(steel fiber)는 1910년대에 이미 초보적 형태로 개발되어 있었으나, 이러한 요구에 부합하여 1960년 미국의 Romualdi와 Bastson[1,2]이 현재의 형태로 개선함으로써 본격적으로 적용되기 시작하였다.

섬유(fiber)를 이용한 취성재료 보강의 역사는 고대로 거슬러 올라간다. 흙 속에 잘게 썰은 짚을 섞어서 흙벽돌이나 토담 축조에 사용하였고, 석회 모르타르에 말총을 섞어서 취성을 보강하여 연성을 증가시켰다. 20세기에

1)정회원, 강원대학교 지구시스템공학과 교수
2)학생회원, 강원대학교 대학원 박사과정
원고접수일 : 2000년 3월 27일
원고 심사완료일 : 2000년 5월 19일

들어와서 시멘트 페이스트에 석면섬유를 혼입하는 방법이 시도되었으나 인체에 대한 유해성으로 인해 널리 사용되지 않았다. 1950년대 러시아에서 개발된 유리섬유는 시멘트의 알칼리 환경에서 침해를 받는 단점이 있었으나, 영국의 Majumdar에 의해 내알칼리성 유리섬유로 개선되어 사용되고 있다. 그러나 이는 높은 인장강도가 요구되는 경우에 취약한 단점이 있다.[2] 이밖에도 유기섬유(organic fiber), 자연섬유(natural fiber)등이 콘크리트의 보강재로 사용되고 있으나 콘크리트의 인장강도, 휨강도, 균열 저항성, 연성, 전단강도, 내충격성 등을 모두 호전시킬 수 있는 섬유로는 현재까지 강섬유가 가장 적당한 것으로 알려져 있다.[2]

미국과 유럽 등지에서는 지금까지 약 30여 년에 걸쳐 강섬유의 적용에 대한 연구를 활발히 수행하여 왔다. 그 결과 취성 재료인 콘크리트를 강섬유로 보강할 경우 압축강도, 인장강도 및 휨강도에 있어 다소간의 증가 효과를 얻을 수 있을 뿐만 아니라, 특히 미세 균열의 발달을 효과적으로 억제하는 것으로 나타났다.[3,4]현재 세계적으로 강섬유의 사용은 점차 증가하는 추세에 있으며, 공장 바닥, 도로 포장, 철도, 터널이나 핵폐기물 처리시설, 유류, 가스등의 지하 비축시설 등의 대규모 지하공동 등에 사용되는 콘크리트의 보강재로 그 적용 범위가 광범위하다.

국내의 경우 콘크리트 보강재로서 강섬유의 사용은 10여년 전부터 항만 하역장이나 대단위 물류창고, 유류 비축을 위한 지하공동과 일부 지하철 공사나 석탄 광산 등의 건설에서 지보재로써 시험적으로 시작되었다. 강섬유가 구조 보강재로 본격적으로 사용되기 시작한 것은 터널의 지보를 위하여 강섬유 보강 숏크리트(SFRS, Steel Fiber Reinforced Shotcrete, 이하 SFRS라 칭함)를 적용한 1990년대 중반부터라고 할 수 있다. 현재 한국도로공사에서 발주하는 전체 고속도로 터널에 강섬유 보강 숏크리트가 적용되고 있으며, 지하철이나 지방도, 도수터널 등에도 급속도로 확산 적용되고 있는 추세이다.[1,5]

강섬유 보강 숏크리트의 적용범위가 확대되고 있음에도 불구하고 수십 년의 적용경험을 가진 선진 외국에 비해 시공기술의 후진성이나 체계적인 연구의 미흡 등으로 강섬유 보강 숏크리트의 적용에 있어서 많은 문제점을 가지고 있는 것이 지금 우리가 처해있는 실정이다. 특히, 현실적인 강섬유 보강 숏크리트 품질관리규정이 확립되지 않아서 수많은 시공현장에서 적용상의 혼란을 초래하고 있다.

현재 전세계적으로 통용되고 있는 강섬유 보강 숏크리트 품질관리 규정은 인성지수를 이용하여 인성을 평가하는 ASTM,[6] 인성 지수와 잔류강도계수를 이용하는 ITA,[7,8] 등가휨강도를 이용하는 JSCE[9] 그리고 일정 처짐에서의 잔류강도와 slab의 에너지 흡수능력을 이용하여 강섬유 보강 숏크리트를 평가하는 EFNARC[10]등에 의해 제시되어 있는데 한국도로공사에서는 JSCE의 등가휨강도(f_e) 및 인성계수(R_e)에 의해 평가하는 방법을 채택하여 적용하고 있다.[11]

본 연구에서는 평가 기준 항목의 타당성을 살펴보고 ASTM, ITA, JSCE, EFNARC의 강섬유 보강 숏크리트 품질관리 규정들과 현재 한국도로공사에서 적용하고 있는 품질 관리 규정을 검토하여 강섬유 보강 숏크리트의 품질관리 규정에 대한 개선 방안을 제안하고자 한다.

이러한 연구목적을 충족시키기 위해 국내에서 사용 중인 특징적인 6가지 강섬유를 채택하여 휨인성시험을 실시한 후, ASTM, ITA, JSCE, EFNARC 그리고 한국도로공사 품질관리 규정에 의해 시험결과를 분석함으로써 각 방법이 가지고 있는 문제점을 파악하고 이를 토대로 휨인성 평가방법에 대한 개선 안을 도출하고자 하였다.

연구결과를 통해 제안된 강섬유 보강 숏크리트의 품질평가 방법의 개선 안은 현행 강섬유 보강 숏크리트 품질관리 규정의 문제점을 보완하여 효과적인 품질관리 지침을 확립하는데 기여하고, 더 나아가서 터널이나 대규모 지하공동 등 지하구조물의 안정성 확보에 도움이 되리라 기대한다.

2. 강섬유 보강 숏크리트(SFRS)의 특성

2.1 강섬유

SFRS는 기존의 숏크리트에 강섬유를 혼입하여 타설하는 것을 말한다. 최근 우리 나라에 새로이 도입 적용되고 있는 강섬유는 사용하는 소재의 형태와 가공방법에 따라 크게 신선절단법, 박판절단법, 후판절삭법 및 용강추출법의 4종류로 나눌 수 있다. 세계적으로 많이 사용되는 것은 전자의 세가지이며 국내에서는 신선절단법과

Table 1. Classification of steel fiber by ASTM A820-96

Type	Source	Shape
Type I	cold drawn wire	straight or deformed
Type II	cut sheet	
Type III	melt-extracted	
Type IV	other fibers	

Fig. 1. Classification of steel fiber currently being used in Korea

박판절단법이 많이 사용되고 있다. ASTM A820-96에서는 강섬유를 Table 1과 같이 분류하고 있다.

현재 국내에서 제조되거나 수입되고 있는 강섬유를 가공 방법에 따라 나누면 Fig. 1과 같다.

2.2 와이어메쉬 보강 숏크리트(WMRS)와 SFRS의 특성비교

본 절에서는 휨응력에 대한 WMRS와 SFRS의 지지력을 계산하여 터널에서의 숏크리트 지보 설계 시 주목해야 할 중요한 결정 요소를 검토 파악하고자 하였다.

2.2.1 1 메쉬 숏크리트 층의 지지력

WMRS의 경우 실제 시공 시에는 와이어메쉬의 위치가 불규칙한 경우도 있으나 여기에서는 Fig. 2와 같이 와이어메쉬가 숏크리트 층의 중간에 위치한 것으로 가정하였다.

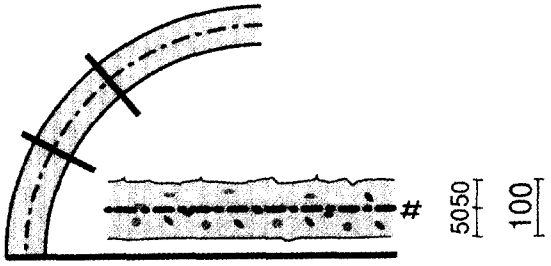

Fig. 2. Design of the 1 mesh reinforced shotcrete layer (in mm)

한 층의 와이어메쉬를 보강한 숏크리트 층의 휨모멘트는 식(1)에 의해 계산할 수 있다.

$$M_{m,u} = 0.9 \cdot \frac{d}{2} \cdot A_s \cdot \sigma_{s,u} \tag{1}$$

여기서, $M_{m,u}$는 극한휨모멘트(Nm/m), d는 숏크리트층의 두께(mm), A_s는 와이어메쉬의 단면적(mm^2), $\sigma_{s,u}$는 와이어메쉬의 극한전단강도(N/mm^2)이다.

식(1)에 포함된 각 변수들은 다음과 같이 가정하였다.

$d = 100$ mm
$A_s = 131$ mm^2 (#150/5)
$\sigma_{s,u} = 460$ N/mm^2

따라서 1 mesh 숏크리트 층의 극한 휨모멘트는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} M_{m,u} &= 0.9 \times 50\ \text{mm} \times 131\ \text{mm}^2/\text{m} \times 460\ \text{N/mm}^2 \\ &= 2{,}711{,}700\ \text{Nmm/m} \\ &= 2{,}712\ \text{Nm/m} \end{aligned} \tag{2}$$

2.2.2 SFRS 층의 지지력

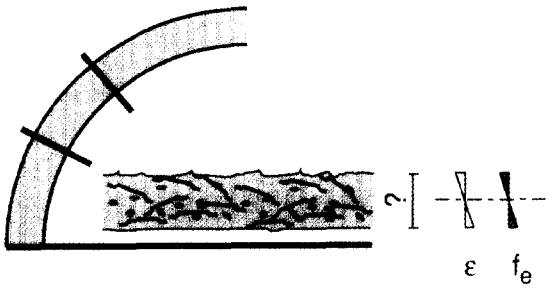

Fig. 3. Design of SFRS layer

Fig. 3과 같이 SFRS를 타설한 경우, 와이어메쉬를 사용한 숏크리트의 층과 동일한 극한 휨 모멘트를 발현하기 위한 SFRS 층의 두께를 산정하기 위한 공식은 식(3)과 같다.[12]

$$M_{SF,u} = f_e \cdot b \cdot \frac{d^2}{6} \tag{3}$$

여기서, $M_{SF,u}$는 SFRS의 휨모멘트(Nm/m), f_e는 SFRS의 등가휨강도(N/mm^2), b는 재하면의 폭(mm), d는 숏크리트층의 두께(mm)이다.

식(3)에 사용된 변수들 중 한 층의 와이어메쉬를 보강한 숏크리트 층에 상응하는 휨모멘트를 가질 수 있도록 $M_{SF,u}$는 식(2)의 $M_{m,u}$와 동일하게 두었으며 재하면의 길이는 같고, SFRS의 등가휨강도 f_e는 도로공사 규정에 의거하여 설계휨강도의 68%인 2.72 N/mm^{2}으로 하였다.

따라서, WMRS와 동일한 휨모멘트를 갖기 위한 SFRS층의 두께는 식(4)와 같다.

$$\begin{aligned} d^2 &= \frac{6 \cdot M_{SF,u}}{f_e \cdot b} \\ &= \frac{6 \times 2,712,000}{2.72 \times 1,000} \\ &= 5,982\text{mm}^2 \end{aligned} \tag{4}$$

이 되므로 $d = 77$ mm 가 된다.

이상의 계산 결과, WRMS와 동일한 극한 휨모멘트를 발현할 수 있는 SFRS 층의 두께는 현저히 감소됨을 알 수 있다. 따라서 숏크리트 타설량을 절대적으로 감소시킬 수 있기 때문에 강섬유의 사용은 경제적 측면에서도 유리한 것을 알 수 있다.

여기에서 SFRS의 지지력은 층의 극한 휨모멘트, 폭 및 두께에 의해 좌우되는 것을 알 수 있으며, 특히 식(3)에서 극한 휨모멘트($M_{SF,u}$)는 등가휨강도(f_e)에 의해 결정된다는 것을 알 수 있다. 따라서 SFRS의 품질을 평가하기 위한 기준은 시공된 층의 두께가 적절한 경우, 등가휨강도(f_e)에 두는 것이 타당한 것으로 판단된다.

2.3 국내 · 외 SFRS 품질검사 규정

현재 세계적으로 적용되고 있는 SFRS의 휨인성에 대한 품질검사규정은 인성지수를 산정(ASTM C 1018)[6]한 후 performance level을 평가하는 방법(ASTM C 1116)을 적용하는 미국의 규정, 인성지수와 잔류강도계수를 사용하여 SFRS의 등급을 평가하는 ITA 규정[7], 등가휨강도를 산정하여 휨인성을 평가하는 일본의 JSCE-SF4 규정[9] 그리고 휨인성 시험편에서 일정 처짐 변위에서의 잔류강도를 산정하여 잔류 강도 등급을 평가하고 slab test를 통해서 SFRS의 에너지 흡수력을 평가하는 두 가지 방법을 사용하는 유럽통합규격인 EFNARC[10]을 들 수 있다. 서론에서 언급했듯이 국내에서는 한국도로공사가 JSCE규정을 참고하여 적용하고 있다. 이러한 방법들은 시험방법에 있어서는 ASTM에서 제시한 방법과 거의 동일하나 결과의 처리 방법에 있어서 상이한 기준을 제시하고 있다.

본 연구에서는 이러한 각 규정을 적용하여 현장 타설한 동일한 SFRS 시료에 대해 품질을 시험 평가하였으며 각 규정의 중요한 특징 및 평가 방법은 부록 A에 요약 수록하였다.

3. 시험 장치 및 방법

3.1 시험장치

시험기는 미국 SBEL(Structural Behavior Engineering Laboratories)사의 서보시스템(Servo Dynamic

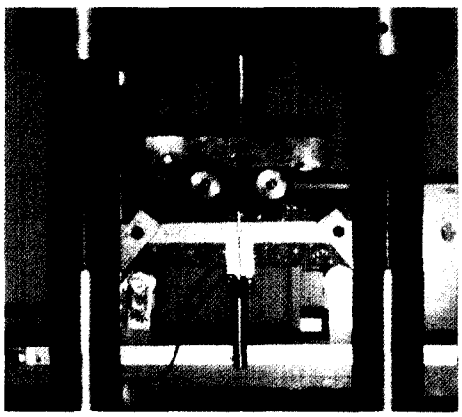

Fig. 4. Test set up for flexural toughness test

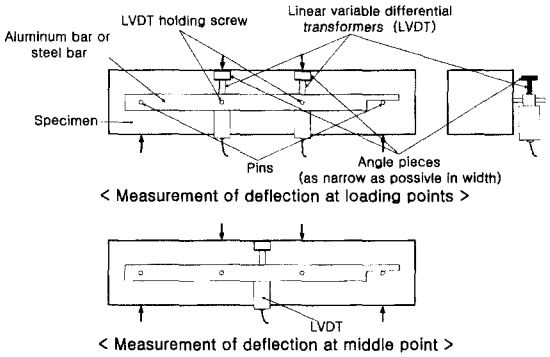

Fig. 5. Schematic design of deflection measurement for flexural toughness test

Test System, Model 547)으로 프레임의 최대 가압 용량은 100톤이나 가변적으로 설정할 수 있으므로 본 시험에서는 20톤으로 하였다. 시험기는 가압용 프레임, 조정부(control panel), 유압펌프로 구성되어 있으며 시험 시 재하수준, 재하속도, 재하파형 등은 조정부에 연결된 개인용 컴퓨터에 의해 제어된다. 하중 및 변위 측정치는 본 시험에서는 별도로 아날로그/디지털 변환기를 사용하여 기록하였다. Fig. 4는 휨인성시험용 시험편을 시험기에 설치한 모습이다.

휨인성시험 시 발생하는 빔의 변위 측정은 일반적으로 사용되는 방법인 중앙점 순수처짐변위를 측정하였다. Fig. 5는 휨인성시험에서의 중앙점 순수처짐변위 측정방법을 도시한 것이다.

3.2 휨인성 시험편의 제작

3.2.1 시험 대상 강섬유

본 연구에서는 가공방법과 형상에 따라 특징적인 6가지 강섬유를 연구 대상으로 하였다. 총 11회의 SFRS 현장 타설에 의해, 회당 3개씩 총 33개의 시험편을 제작하였다. Table 2에는 6종의 강섬유를 A~F로 구분하고 각 강섬유를 사용하여 타설한 횟수에 따라 series로 구분하여 각각의 형상, 크기, 인장강도, 혼입률 등을 수록하였다. 여기서 fiber type은 Table 1에 의해 분류된 것이며, fiber volume concentration은 숏크리트 단위체적당 혼입백분률이다. 현재 한국도로공사 강섬유 혼입률 규정에는 숏트리트 톤당 40 kg이상의 강섬유를 사용하여야 하며 요구되는 휨인성 기준을 만족하여야 한다.

3.2.2 시험편 제작

강섬유 보강 숏크리트의 휨인성시험을 위한 시험편의 제작은 ASTM C 1018규정에 의거, 타설 현장에서 숏크리트 머신을 이용하여 성형틀에 타설한 후 100×100×350 mm의 빔 형태로 절단하여 각 series에 따라 3개씩 제작하였다. 시험편은 타설 후 재령 28일 까지 23±1.7°C로 유지된 양생조에서 수중양생하였다. 콘크리트 배합 재료, 배합비에 대한 사항은 부록 B에 수록하였다.

3.3 휨인성 시험방법

본 시험은 ASTM C 1018에 의거 삼등분점굴곡시험법(third point loading test)에 의하여 실시하였으며, 변위 측정은 Fig. 5에 설명한 중앙점 순수처짐 측정방법으

Table 2. Specification of steel fiber used for test

Series	Shape	Size (mm)	Tensile strength (MPa)	Aspect ratio	Fiber volume concentration V_f (%)	Fiber type
A1		0.4×0.8×35 (t×w×l)	over 700	54.7	0.51	II
B1		0.4×0.8×35 (t×w×l)	over 700	54.7	0.51	II
B2					0.51	
B3					0.57	
C1		0.7×35 (Φ×l)	over 1,000	50	0.51	I
D1		0.5×30 (Φ×l)	over 1,100	60	0.51	I
D2					0.70	
E1		0.7×35 (Φ×l)	over 1,200	50	0.51	I
E2						
F1		0.7×35 (Φ×l)	over 1,100	50	0.51	I
F2					0.63	

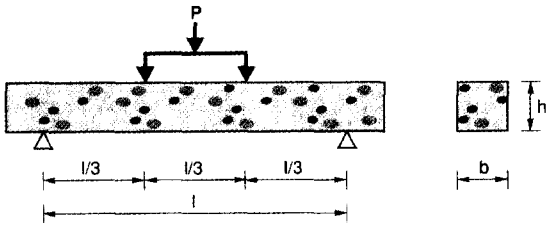

Fig. 6. Schematic diagram of third point loading

로 하였다. 가압조건은 정속 변위속도를 0.1 mm/min가 되도록 유지하였으며 중앙점 순수 처짐 변위가 2 mm가 될 때까지 시험하였다. Fig. 6은 삼등분점굴곡시험법을 도시한 것이다.

본 연구에서 가압조건과 중앙점 순수 처짐 변위 측정은 한국도로공사 규정에 의거(Fig. 5 및 6 참조-ASTM 법과 동일)하였으며 결과의 처리에서 휨인성지수(flexural toughness indices)와 잔류강도계수(residual strength factor)는 ASTM C 1018에 의하여 계산하였고, 잔류 강도 등급(residual strength class)은 EFNARC 규정에 의해 계산하였다. 등가휨강도(equivalent flexural strength) 및 인성계수(toughness quotient)는 한국도로공사의 강섬유보강숏크리트 품질 관리 규정에 의하여 산정하였다.

4. 휨인성 평가 결과 및 고찰

SFRS 휨인성시험에서 얻어진 하중-중앙점 순수처짐변위 곡선을 이용해서 ASTM C 1018에 의거, 인성지수와 잔류 강도 계수를 산정하였다. 그리고 EFNARC의 sprayed concrete에 대한 규정에 의거, 중앙점 순수 처짐 변위 0.5, 1 및 2 mm 각각에서 잔류 강도를 산정하였다. 한국도로공사 규정에 의한 평가에서는 등가휨강도(f_e)와 인성계수(R_e)값을 산정하였다. 이중 EFNARC 규정에 의하면 0.5, 1, 2, 4 mm의 변위에서 잔류강도를 산정하여 잔류 강도 등급을 평가하도록 규정되어 있으나 본 연구에서는 타 평가 결과와의 비교를 위해서 4 mm에서의 잔류강도 산정을 생략하였다. Table 3은 series별로 각 규정에 의해 휨인성을 평가한 결과이다.

4.1. 한국도로공사 SFRS 품질관리 규정

Fig. 7은 총 33개의 시험편을 등가휨강도(f_e)가 가장

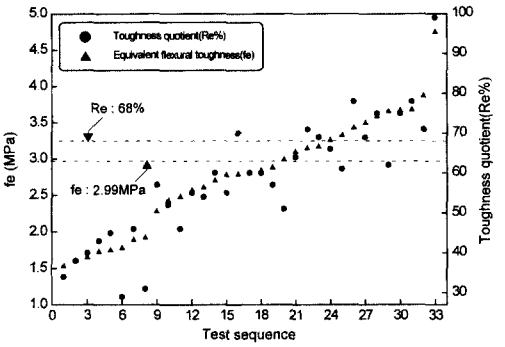

Fig. 7. Comparison between equivalent flexural toughness(f_e) and toughness quotient(R_e)

Table. 3. Results of flexural toughness evaluation

Series of specimens \ Eval.Method	f_u* (MPa)	f_e (MPa)	ASTM	EFNARC	ITA	R_e (%)
A	4.00	1.72	1	0	2	42
B1	4.60	2.54	3	1	3	55
B2	5.38	2.98	2	1	3	55
B3	5.78	2.07	2	0	2	35
C1	4.92	3.43	2	2	3	69
D1	4.68	3.18	2	2	3	68
D2	4.96	4.11	2	3	4	82
E1	4.27	1.68	0	1	1	39
E2	4.70	2.69	2	1	3	56
F1	5.07	3.48	2	2	3	68
F2	4.35	2.92	2	2	3	67

*f_u : flexural strength

작은 시험편부터 큰 순서로 정렬해서 도시하고 이를 인성계수(R_e)와 비교한 것이다.

Fig. 7에 나타난 것처럼 등가휨강도의 분포와 인성계수(휨강도에 대한 등가휨강도의 백분율)의 분포는 일치하지 않고 있음을 알 수 있다. 특히, 한국도로공사의 등가휨강도 설계치($f_{e,design}$)인 2.99 MPa을 상회하는 총 14개의 시험 결과 중 5개의 경우, 품질검사 기준인 인성계수 68%에 미치지 못하는 결과를 보였다. 이것은 현재 한국도로공사에서 적용하고 있는 인성계수가 휨강도의 변동에 영향을 받으므로 등가휨강도의 수치를 적절히 반영하지 못하고 있음을 의미한다. 등가휨강도가 설계치를 만족할 경우 숏크리트 지지력은 충분하다고 판단되나, 휨강도의 영향으로 인성계수가 낮을 경우 기준치인 68% 이상으로 증가시키기 위해서 강섬유의 혼입량을 증가시켜야 하므로 경제적인 면에서 바람직하지 못하다고 판단된다.

4.2 ASTM 규정(Performance level)

Fig. 8은 Fig. 7과 마찬가지로 총 33개의 시험편을 등가휨강도(f_e)가 가장 작은 시험편부터 큰 순서로 정렬해서 도시하고 이를 performance level과 비교한 것이다.

ASTM의 performance level에 의한 휨인성 평가의 경우, 전체 시험편에 대한 평가가 일관성 없는 변화를 보이는 것을 알 수 있다. 이러한 결과의 원인은 등가휨강도의 경우 중앙점 순수처짐변위 2 mm까지의 시험결과를 이용해서 값을 산정하지만, ASTM의 performance level은 보통 초기균열이 발생하는 중앙점 순수처짐변위 약 0.07 mm 수준의 10.5배인 약 0.7 mm이내의 결과만으로 등급을 산정하기 때문이다. 즉, 초기 균열이 발생한 이후 처짐변위 약 0.7 mm 구간까지만 높은 잔류강도를 유지하고 이후 2 mm까지 급격히 잔류강도가 낮아짐으로

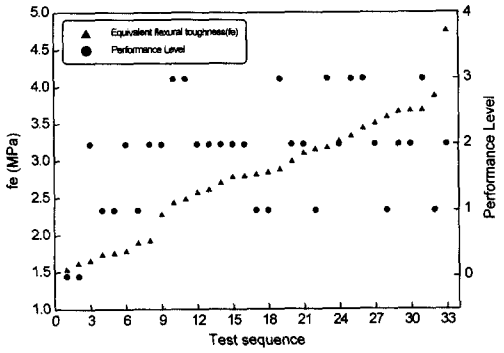

Fig. 8. Comparison between equivalent flexural toughness(f_e) and performance level

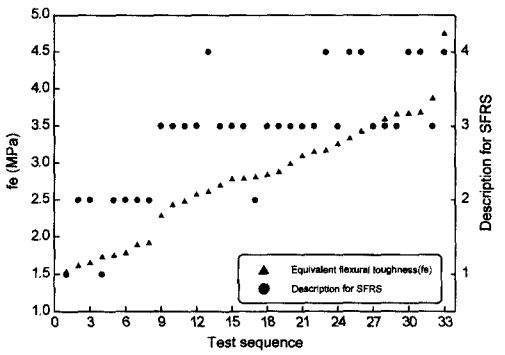

Fig. 9. Comparison between equivalent flexural toughness(f_e) and ITA description for SFRS

써 취약성을 보이는 경우가 전체 2 mm까지의 변위구간에서 적정 수준의 잔류강도를 계속적으로 유지하는 경우보다 높은 등급으로 평가될 수 있는 경우가 있을 수 있다. 일반적으로 휨인성에 영향을 미치는 섬유 혼입율 및 형상비의 효과가 뚜렷이 나타날 수 있는 최적의 처짐변위 평가 구간은 지간(supporting point span)의 1/150인 2 mm인 것으로 알려져 있다.[5]

따라서, ASTM의 performance level의 산정은 한국도로공사의 휨인성 평가방법에 비해 상대적으로 작은 중앙점 순수처짐변위의 범위만을 대상으로 하기 때문에, 초기균열 발생 이후의 SFRS 거동에 대해 등가휨강도처럼 휨모멘트의 변화를 명확히 반영할 수 없는 것으로 판단된다.

4.3 ITA 규정(suggested description for SFRS)

국제터널협회(ITA)에서 1985년 Morgan이 제안한 휨인성등급은 SFRS의 휨인성을 4개의 유형으로 구분하고 있다. Fig. 9는 총 33개 시험편의 등가휨강도를 ITA 규정의 인성 등급과 비교한 것이다. 일부를 제외한 대부분의 시험결과에 대해 ITA의 휨인성 등급에 의한 평가는 등가휨강도에 관계없이 양호한 판정이 나왔다. 이는 휨인성이 설계기준에 미치지 못하는 SFRS가 높은 등급으로 평가될 수 있고, 그 평가 결과를 SFRS의 휨인성 지표로 할 경우 SFRS의 안전성에 문제가 있을 수 있다는 단점을 가지고 있다.

4.4 EFNARC 규정

EFNARC의 sprayed concrete에 대한 규정에서 잔류강도등급은 처짐변위 0.5, 1, 2, 4 mm에서의 잔류강도를 측정 종합하여 4개의 등급으로 SFRS의 휨인성을 평가하고 있다. Fig. 10은 총 33개 시험편의 등가휨강도와 잔

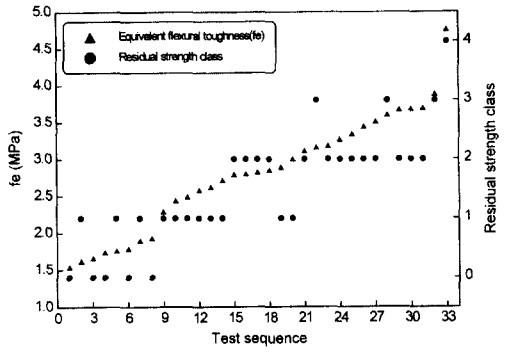

Fig. 10. Comparison between equivalent flexural toughness(f_e) and residual strength class

류강도등급을 비교한 것이다.

잔류강도등급에 의한 휨인성 평가는 대체적으로 등가휨강도의 변화를 반영하는 경향을 보이는 것으로 판단된다. 그러나 등급을 4개의 큰 범주로 구분함에 따라 휨모멘트의 차이를 정량적으로 정확히 반영하지는 못하고 있으며, 잔류강도등급의 산정에 중앙점 순수처짐변위 0.5 mm 이후의 구간에서 획득된 결과만을 적용하기 때문에 중앙점 순수처짐변위 0.5 mm 이내의 구간에서 높은 잔류강도를 발현하는 특성을 가진 SFRS의 경우 이를 정확히 반영하지 못하는 단점이 있다.

5. 휨인성 평가 방법에 대한 제안

현행 각 SFRS 휨인성 평가 규정에 의해 시험결과를 분석한 결과 각각의 규정에서 나타나는 문제점을 요약하면 다음과 같다.

- 한국도로공사의 SFRS 품질 관리 규정의 경우 인성계수를 계산하기 위해 적용하는 공식에 휨강도가 변수로 작용함에 따라 해석결과가 휨강도에 따라 좌우되는 경향을 보였다. 이는 균열에 대한 SFRS의 저항성을 나타내는 휨인성을 인성계수가 정확히 반영하지 못하는 데 대한 원인인 것으로 판단된다.

- ASTM의 performance level과 ITA의 SFRS 인성등급에 의한 SFRS 휨인성 평가의 경우에는 초기균열이 발생하는 시점의 처짐변위를 산정하는 과정에서 해석자의 주관적인 판단으로 인해 인성지수가 영향을 받는다. 또한 평가에 적용되는 중앙점 순수처짐변위 구간이 너무 작아서 한국도로공사나 EFNARC에 비해 전체적인 등가휨강도를 평가하기 어려운 문제가 있고, 특히 ITA에 의한 평가의 경우 등가휨강도가 한국도로공사의 SFRS 터널지보설계기준에 못 미치는 경우에도 높은 등급으로 평가되어 안정성에 문제가 있는 것으로 판단된다.

- EFNARC의 잔류강도등급에 의한 휨인성 평가의 경우 전반적으로 등가휨강도의 경향과 일치하였다. 하지만 중앙점 순수처짐변위 0.5 mm 이후 구간을 평가에 적용하기 때문에 콘크리트 균열 후 초기 0.5 mm이내의 범위에서 높은 잔류강도를 보이는 SFRS의 경우 이를 평가에 반영하지 못하는 단점을 가지고 있었다.

이상에서의 고찰과 식(3)에서 보인 바와 같이 등가휨강도는 SFRS의 지지력을 나타내는 휨모멘트와 직접적으로 비례하며, 휨인성을 평가하기 위한 세계 각국의 기준은 등가휨강도의 정량적 수치를 적절히 반영하는데 다소간의 단점을 보이고 있으므로, 본 연구에서는 SFRS의 휨인성을 평가하는 기준으로서 등가휨강도(f_e)와 인성계수(R_e)를 적절히 변형 적용하는 다음의 4가지 경우를 고려함으로써 새로운 평가기준을 제시하고자 하였다.

Case I : 현행 한국도로공사의 평가방법을 적용하는 방법(휨강도(f_u)를 인성계수(R_e)계산에 적용).

Case II : 하중-중앙점 순수처짐변위 곡선 상에서 설계휨강도 이상인 부분을 Fig. 11과 같이 제거한 후 등가휨강도를 산정하고, 인성계수 계산에서 설계휨강도($f_{u,design}$)를 휨강도로 대체하며, 곡선 상에 설계휨강도를 넘는 부분이 없을 경우 시험에서 획득된 휨강도를 적용하여 인성계수를 계산하는 방법.

Case III : 둘째 방법과 동일한 방법으로 제거한 후, 모든 경우의 인성계수 계산에서 설계휨강도를 휨강도로 대체 적용하는 방법.

Case IV : 현행 한국도로공사의 평가방법에서 설계휨강도를 휨강도로 대체 적용하는 방법.

Table 4는 이상의 4가지 case에서 제시한 조건하에서

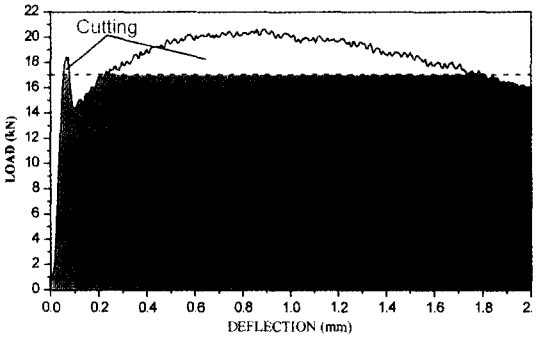

Fig. 11. Elimination of energy above flexural design strength

Table 4. Evaluation of flexural toughness for four cases

Specimen ID	f_u (MPa)	f_e (MPa)	Cut f_e (MPa)	R_e(%)			
				CASE I	CASE II	CASE III	CASE IV
A1-1	4.10	1.66	1.66	40.49	40.49	37.73	37.73
A1-2	3.91	1.76	1.76	45.01	45.01	40.00	40.00
A1-3	4.01	1.74	1.74	43.39	43.39	39.55	39.55
B1-1	4.03	2.29	2.29	56.82	56.82	52.05	52.05
B1-2	4.71	2.44	2.44	51.87	55.46	55.46	55.53
B1-3	5.08	2.89	2.78	56.90	63.22	63.22	65.69
B2-1	5.86	3.01	2.99	51.33	67.89	67.89	68.36
B2-2	5.43	3.35	3.20	61.68	72.67	72.67	76.12
B2-3	4.85	2.62	2.62	54.11	59.60	59.60	59.64
B3-1	6.06	1.93	1.88	31.86	42.72	42.72	43.88
B3-2	6.00	1.79	1.78	29.84	40.50	40.50	40.70
B3-3	5.30	2.50	2.46	47.15	56.00	56.00	56.80
C1-1	4.79	3.12	3.11	65.10	70.74	70.74	70.87
C1-2	5.08	3.51	3.50	69.13	79.59	79.59	79.81
C1-3	4.89	3.68	3.66	75.34	83.13	83.13	83.73
D1-1	4.37	3.44	3.44	78.72	78.72	78.18	78.18
D1-2	4.94	3.28	3.27	66.33	74.39	74.39	74.48
D1-3	4.73	2.85	2.85	60.30	64.80	64.80	64.82
D2-1	4.79	4.76	4.30	99.44	97.67	97.67	108.25
D2-2	5.42	3.88	3.87	71.60	87.88	87.88	88.20
D2-3	4.68	3.70	3.66	79.03	83.24	83.24	84.06
E1-1	4.13	1.90	1.90	46.00	46.00	43.18	43.18
E1-2	4.47	1.54	1.54	34.54	35.07	35.07	35.09
E1-3	4.23	1.62	1.62	38.30	36.82	36.82	36.82
E2-1	4.99	2.79	2.79	55.96	63.38	63.38	63.47
E2-2	4.49	2.71	2.71	60.43	61.64	61.64	61.67
E2-3	4.64	2.58	2.58	55.61	58.62	58.62	58.64
F1-1	5.86	3.67	3.66	62.67	83.13	83.13	83.46
F1-2	4.57	3.19	3.19	69.73	72.41	72.41	72.43
F1-3	4.80	3.60	3.60	75.08	81.88	81.88	81.90
F2-1	4.70	2.82	2.82	60.06	64.13	64.13	64.16
F2-2	4.40	3.16	3.16	71.82	71.82	71.82	71.82
F2-3	3.95	2.80	2.80	70.89	70.89	63.64	63.64
Average		2.81	2.78	58.68	64.04	63.07	63.71

Table 5. General trends of evaluation results under the conditions of four cases

	Case I	Case II	Case III	Case IV
$f_u < f_{u,design}$	low f_e & low f_u results high R_e	low f_e & low f_u results high R_e	lower R_e compared with CASE I	R_e is independent to f_u
$f_u \geq f_{u,design}$	high f_e & high f_u results low R_e	high f_e & high f_u results low R_e	higher R_e compared with CASE I	R_e is independent to f_u

SFRS의 휨인성을 평가한 결과이다.

Table 4의 결과를 토대로 각 case에서 나타난 경향을 분석해 보면 Table 5와 같다.

Case I에서 휨강도(f_u)가 설계휨강도($f_{u,design}$) 보다 낮을 경우 인성계수(R_e)값이 비정상적으로 높게 평가되어 안전상의 문제를 야기할 수 있으며, 휨강도가 설계휨강도보다 높을 경우 인성계수값이 너무 낮게 평가되어 과다한 강섬유를 사용할 우려가 있다.

Case II, case III, case IV의 3 가지 방법에 의한 평가 결과는 D2-2시험편을 제외한 대부분의 경우 비슷한 인성계수 수준을 보였으며, case II와 case III에서 휨강도가 설계휨강도를 초과한 경우 등가휨강도가 월등히 높

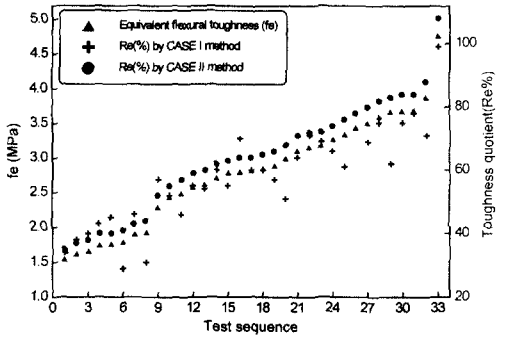

Fig. 12. Comparison of equivalent flexural toughness(f_e) and toughness quotient(R_e) from case I and IV

게 나온 D2-1시험편을 제외한 대부분에서 Fig. 11에서의 방법과 같은 보정의 영향은 미약하다고 판단되었다. 따라서 인위적으로 설계휨강도 이상의 부분을 제거하고 인성계수를 계산하는 것은 오히려 또 다른 오류를 야기할 가능성이 있는 것으로 판단된다.

이상의 고찰로부터 case II 및 case III를 고려 대상에서 제외하고 case I과 case IV의 방법으로 산정된 인성계수들을 비교하였다.

Fig. 12는 case I 및 case IV에서의 인성계수와 등가휨강도를 비교한 것이다. 등가휨강도가 설계휨강도보다 낮은 경우 인성계수는, case I이 case IV 보다 높게 나타나고, 등가휨강도가 설계휨강도보다 높은 경우에는 case IV가 case I보다 높게 나타나는 경향을 보였다. 여기에서 등가휨강도가 설계휨강도보다 낮은 경우는 SFRS의 품질이 적정 수준에 미치지 못한다는 것을 의미하며, case I의 경우 Fig. 12의 결과에서도 보이듯이 인성계수의 분산이 크게 나타나 현행 한국도로공사 규정과 같이 인성계수 계산 시 휨강도를 적용하는 방법은 SFRS의 휨인성에 대한 정량적인 값을 왜곡한다는 것을 알 수 있다.

따라서, SFRS의 품질을 적절하게 반영할 수 있는 방법으로서 인성계수 산정시 계산식에서 휨강도를 설계휨강도로 대체, 적용하여 산정하는 방법인 case IV가 가장 적합하다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 현재 한국도로공사에서 적용하고 있는 등가휨강도와 인성계수에 의한 SFRS의 휨인성 평가 방법에 대한 타당성을 고찰하고 개선안을 제시하고자 하였다. 현장 타설에 의해 제작된 총 33개의 휨인성시험용 시험편을 대상으로 휨인성시험을 실시해서 등가휨강도와 인성계수를 산정한 후 ASTM, ITA, EFNARC의 휨인성 평가 규정과 비교, 분석하였다. 연구결과 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 현행 한국도로공사에서 SFRS의 휨인성을 평가하는 기준으로 사용하는 인성계수값은 시험결과 획득되는 휨강도에 영향을 받으므로 SFRS의 휨인성을 완벽하게 반영하지 못하고, 휨강도가 SFRS의 휨인성에 대한 정량적인 값을 왜곡하므로 휨인성 평가 방법으로 타당하지 않다고 판단된다.

2. ASTM의 performance level에 의한 SFRS의 휨인성 평가는 중앙점 순수처짐변위 0.7 mm이상의 변위에서 발생하는 변형특성을 고려하지 않으므로 SFRS의 휨인성을 완벽하게 반영할 수 있다고 할 수 없으며, 인성지수 산정의 기준이 되는 초기균열 산정시 해석자의 주관이 개입될 소지가 있다.

3. ITA의 SFRS 등급은 타 규정에 비해 비교적 높은 등급을 나타내었다. 이는 등가휨강도가 설계기준에 미치지 못하는 경우에도 양호한 결과로 오판하게 되어 안정성에 문제가 있는 것으로 판단된다.

4. EFNARC의 잔류 강도 등급에 의한 SFRS의 휨인성 평가방법은 대체적으로 등가휨강도와 동일한 경향을 보이나, 등급 산정에 중앙점 순수 처짐 변위 0.5 mm이내에서 발생한 휨인성은 고려되지 않는다. 따라서 0.5 mm 이내에서 높은 잔류 강도를 발현하는 특성을 가진 강섬유를 혼입한 경우 정확한 평가가 어렵다고 판단된다.

5. 이러한 각 방법의 단점을 보완하기 위하여 네 가지의 휨인성 산정방법을 설정하여 분석한 결과 현행 한국도로공사 SFRS의 휨인성 평가에 사용되는 인성계수 계산식에서 휨강도를 설계휨강도로 대체, 적용하여 산정하는 방법이 가장 타당하다고 판단된다.

사 사

본 연구의 수행을 위하여 연구비 지원과 현장 작업에 도움을 주신 (주)핫파이바, 베카르트코리아(주), 한국도로공사 관계자 여러분과 연구비 일부를 지원해주신 강원대학교 자원개발연구소에 심심한 감사를 드린다.

참 고 문 헌

1. 대한건축학회, 1997, 섬유보강콘크리트, 철근콘크리트분

과위원회 기술보고서 ART97-2, 3~9.
2. 오병환, 1996, 섬유보강 콘크리트의 전망 및 필요성, 한국 콘크리트학회 논문집, 8.4, 5~13.
3. ACI 544 Committee, 1973, State of Art Report on Fiber Reinforced Concrete, J. of ACI, 70, 15~40.
4. ACI Compilation 27, Steel fiber reinforced concrete, 80p.
5. 구봉근, 정경섭, 김태봉, 1992, 강섬유보강이 콘크리트의 강도특성에 미치는영향, 콘크리트 학회지, 4.2, 93~101.
6. ASTM C1018-94b, Standard test method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third -Point Loading), 12p.
7. International Tunnelling Association, 1990, Shotcrete for rock support-guidelines and recommendations, 40p.
8. Morgan, D.R., 1990, Toughness of fiber reinforced shotcrete, Shotcrete for underground support VII, June, Austria, 22p.
9. JSCE, 1985, Method of tests for Flexural strength and Flexural toughness of steel fiber reinforced concrete, JSCE-SF4, 32p.
10. The European Federation of National Associations of Specialist Contractors and Material Suppliers for the Construction Industry, 1993, European Specification for Sprayed Concrete, 40p.
11. 한국도로공사, 1997, 강섬유 숏크리트 시공 및 품질관리 지침, 38p.
12. Vandewalle M., 1997, "Tunneling the world-5th ed.", Bekaert NV, 127~135.

부록 A

A.1. ASTM 규정

ASTM C 1018 (Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber Reinforced Concrete(Using Beam with One-Third Point Loading))에 의한 SFRS의 휨인성시험용 시험편의 경우 혼입하는 강섬유의 길이에 따라 시험편의 크기를 결정하고, 강섬유의 길이에 따른 시험편의 크기는 Table A1과 같다.

휨인성시험에서 인성지수에 대한 ASTM의 주된 판단규정은 콘크리트의 일차 균열이 발생할 때까지의 탄성에너지와 강섬유를 혼입함으로써 증가된 소성에너지의 비(toughness indices)를 산출하는 것이다. 그리고 인성지수를 이용하여 일정구간까지의 잔류강도 계수를 산정하여 전체적인 SFRS의 품질을 평가하는 방법이다.

ASTM규정에 의한 시험 조건은 다음과 같다.

- 성형틀에 타설한 후 saw cutting한 beam
- 규격은 100×100×350 (b×h×l, mm)
- 시험 재령은 28일
- 3등분점재하법 사용
- 변위속도는 0.1 mm/min.
- 중앙점 순수처짐변위 측정

Fig. A1은 휨인성시험 결과 나타나는 전형적인 하중-중앙점 순수 처짐 변위 곡선의 형태이다.

Table A1. Specification of shotcrete beam with fiber length

Steel Fiber length	Specimen depth	Span length	Specimen length
50-75 mm	150 mm	450 mm	least 530 mm
< 50 mm	100 mm	300 mm	least 350 mm

Fig. A1의 곡선을 Fig. A2와 같은 단순화된 모델로 가정하여 초기균열과 인성지수, 잔류강도계수를 산정할 수 있다.

인성지수 계산방법은 Fig. A2에 기재되어 있는 바와 같으며 여기서 정해진 인성지수를 이용해서 잔류강도계수를 산정한다. 잔류강도계수의 계산방법은 다음과 같다.

$$R_{5,10} = 20(I_{10} - I_5)$$

$$R_{10,20} = 10(I_{20} - I_{10})$$

$$R_{10,30} = 5(I_{30} - I_{10})$$

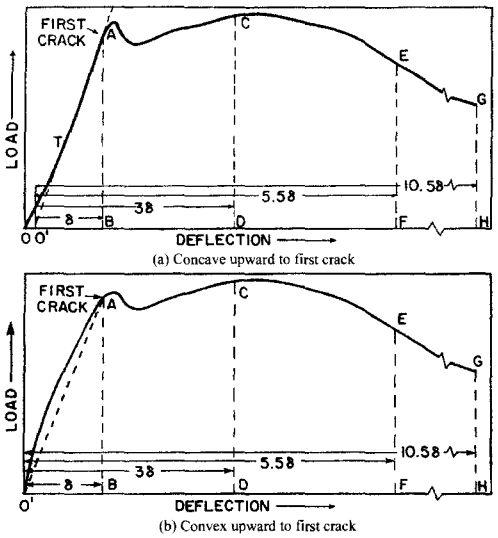

Fig. A1. Important characteristics of the load-deflection curve of SFRS in flexural toughness test

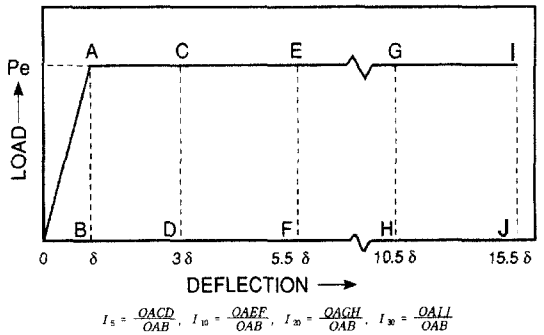

Fig. A2. Definition of toughness indices in terms of multiples of first-crack deflection and elastic-plastic material behavior

Table A2. Standard specification for fiber reinforced concrete and shotcrete (ASTM C 1116-89)

Performance Level	I_5		I_{10}	
	Specified Value	Test Result	Specified Value	Test Result
I	2.7	3.0	5.4	6.0
II	3.6	4.0	7.2	8.0
III	4.5	5.0	9.0	10.0
IV	5.4	6.0	10.8	12.0

Table A3. Specification of SFRS by Morgan (ITA)

항목	등급	I_{10}	I_{30}	$R_{30/10}$
I	Marginal	<4	<12	<40
II	Fair	4	12	40
III	Good	6	18	60
IV	Excellent	8	24	80

이상의 계산결과를 토대로 ASTM에서는 Table A2와 같이 4 단계로 분류된 performance level을 제시하고 있다.

Table A3는 ASTM C 1018에 의해 산정된 인성지수와 잔류강도계수를 사용하여 1985년 Morgan이 제안한 국제터널협회(ITA)의 SFRS의 등급표이다.

A.2. EFNARC 규정

EFNARC(European Specification for Sprayed Concrete)의 경우 강섬유 보강 숏크리트의 휨인성에 대해서 빔 시험에 의한 잔류강도등급과 플레이트 시험에 의한 에너지흡수등급으로 구분하여 규정하고 있다.

잔류 강도 등급을 평가하기 위한 시험편의 제작은 숏크리트 타설 패널로부터 Fig. A3에 도시한 것처럼 75×125×600 mm 크기의 빔으로 절단한다. 그리고 설계자가

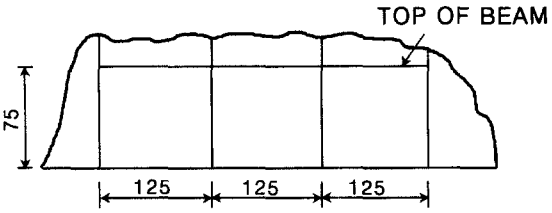

Fig. A3. Cutting and Orientation of beam from the sprayed concrete

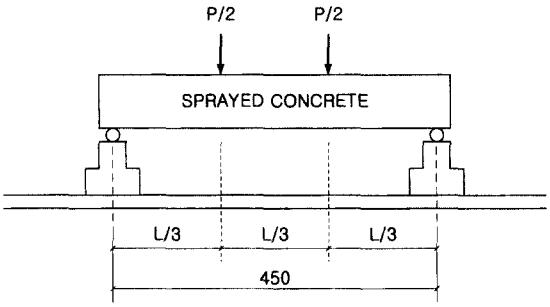

Fig. A4. Flexural testing with third-point loading

요구할 경우 빔의 상부가 인장면이 될 수 있도록 표시하여 시험 전 까지 수중양생을 실시한 후 시험한다.

EFNARC의 잔류 강도 등급 시험 방법은 다음과 같다.- Fig. A4와 같이 삼등분점재하법에 의해 재하

- 재하속도는 시편 중심점의 변형률로 제어하며,
- 0.5 mm에 이를 때까지는 0.25±0.05 mm/min으로 제어하고
- 이후 4 mm 까지는 1.0 mm/min의 속도로 재하 한다.
- 시험기는 실제 변위를 제어할 수 있는 수준의 강성을 요구한다.
- 시험기의 하중 지지 점과 재하 점은 반경 10~20 mm의 둥근 강봉을 사용한다.

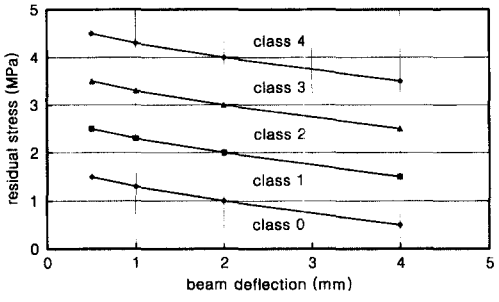

Fig. A5. Residual strength class

Table A4. Residual strength class definition points

Deformation class	Beam deflection (mm)	Residual stress(MPa) for strength class			
		1	2	3	4
	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5
Low	1	1.3	2.3	3.3	4.3
Normal	2	1.0	2.0	3.0	4.0
High	4	0.5	1.5	2.5	3.5

- 시험편 중심점의 변형이 4 mm에 이르면 시험을 마친다.

응력-변위 곡선의 모양에 따라 Fig. A5와 같이 5가지 잔류 강도 등급으로 분류하여 강섬유 보강 숏크리트의 휨인성평가 규정으로 사용하며, 등급표는 Table A4와 같다.

A.3. 한국(한국도로공사) 및 일본 JSCE 규정

한국도로공사는 강섬유 보강 숏크리트의 품질관리 규정에 일본의 JSCE- SF4에 의거한 등가휨강도(f_e) 및 인성계수(R_e)개념을 참고하여 적용하고 있다.

등가휨강도(f_e)는 강섬유 보강 숏크리트의 휨인성과 관계되는 값으로 최대하중에 도달한 후 일정한 변위까지의 휨인성계수로서 평균강도의 개념을 가진다.

1) 변위측정 방법

시험편의 하중-처짐 곡선을 구하는 경우에는 시험편 중앙에서의 순수 처짐을 측정해야 하고, 처짐 측정의 정밀도를 높이기 위해 전기적인 변위계(LVDT)를 사용한다. 강섬유 보강 숏크리트 시험편의 휨인성을 측정하는 값으로 등가휨강도를 사용하는 경우에는 초기균열이 발생할 때의 처짐 변위를 확인할 필요는 없지만 일반적으로 0.1 mm 이내인 것으로 알려져 있다. 한국도로공사에서 규정하는 강섬유 보강 숏크리트의 휨인성 시험시 중앙점 순수 처짐 측정장치는 Fig. A6과 같다.

2) 등가휨강도의 계산 방법

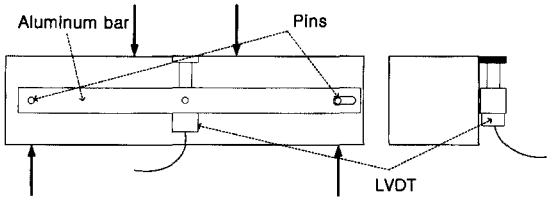

Fig. A6. A view of deflection measurement at apparatus for flexural toughness test by Korea Highway Corporation

휨강도(σ_f)는 삼등분점굴곡시험에서 얻은 최대하중으로부터 식(A1)에 의해 계산된다.

$$\sigma_f = \frac{P_u \cdot 1}{b \cdot h^2} \tag{A1}$$

여기서 P_u는 최대하중

l : 시험편의 지간길이(30 cm 또는 45 cm)

b, h : 시편의 폭, 높이(10 cm 또는 15 cm)

등가휨강도는 사점굴곡시험에서 얻은 하중-처짐 곡선으로부터 규정 처짐 $\delta_{tb}=l/150$ 까지의 변형에너지를 기초로 하여 식(A2)에 의해 계산된다.

$$f_e = \frac{T_b}{\delta_{tb}} \cdot \frac{l}{bh^2} \tag{A2}$$

여기서 T_b : 규정 처짐까지의 휨인성.

δ_{tb} : 규정처짐(l/150)으로 지간이 30 cm인 경우 2 mm, 45 cm인 경우 3 mm이다.

l : 시험편의 지간 길이

b, h : 시험편의 폭, 높이

3) 강섬유 보강 숏크리트의 휨인성 평가규정

4.8×100×100 mm인 와이어메쉬를 보강한 두께 10 cm에 폭이 100 cm인 숏크리트의 휨강도가 4.4 MPa일 때 극한 휨모멘트는 3.195 Nm/m이다.

두께가 8 cm이고 폭이 100 cm인 강섬유 보강 숏크리트에서 동일한 극한 휨 모멘트를 발현하기 위해서는 식(A3)에 의해,

$$\begin{aligned} f_e &= 6 \times M_u/(b \times t^2) \\ &= 6 \times 3.195/(100\text{cm} \times 8\text{cm} \times 8\text{cm}) \\ &= 2.99\text{N/mm}^2 \end{aligned} \tag{A3}$$

이 된다.

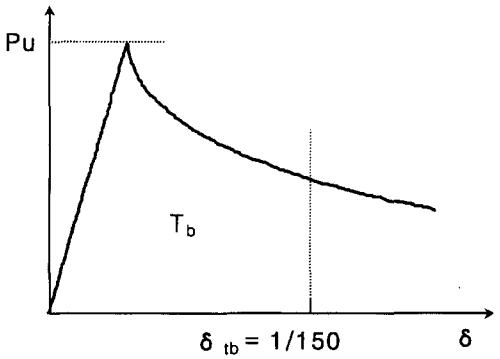

Fig. A7. Load-deflection curve for flexural toughness test

인성계수는 설계휨강도와 등가휨강도의 비로써 다음과 같이 계산된다.

$$R_e = \frac{f_e}{\sigma_t} \times 100(\%) \quad \text{(A4)}$$

설계휨강도에 따른 인성계수는 Table A5와 같다.

Table A5에 근거하여 한국도로공사의 강섬유 보강 숏크리트의 품질평가 규정에서는 설계휨강도 4.4 MPa 및 인성계수 68%의 조건을 각각 만족할 것을 요구하고 있다.

Table A5. Specification of shotcrete in Korea Highway Corporation

f_e(MPa)	σ_t(MPa)	R_e(%)
2.99	5.38	56
	4.89	61
	4.40	68
	3.91	76

부록 B 콘크리트 배합 재료 및 배합비

B.1. 콘크리트 배합

ⓐ 골재

굵은 골재는 파쇄석이고, 잔 골재는 강모래이다. 골재는 현장에서 표본 채취하여 체분석을 실시하였고 비중, 표면수율 등을 시험하여 배합을 수정하였다.

ⓑ시멘트

시멘트는 보통 포틀랜드시멘트로서 비중은 3.16인 것을 사용하였다.

ⓒ기타

일반적으로 숏크리트 타설시에 작업성 향상 및 품질개선을 목적으로 여러 가지 첨가제가 혼입되어 사용되는 경우가 많다. Table B1은 본 연구에서 각각의 첨가제에 대한 사용여부를 나타낸 것이다.

B.2. 배합비

Table B2는 현장에서 타설된 숏크리트의 배합표이다. 최대골재치수, 슬럼프, 공기량 등의 실측치와 물, 시멘트, 골재, 급결제 등의 단위 재료량을 제시하였다.

Table B1. Admixtures used in the shotcrete mix

Silica Fume	Superplasticizer	AE Admixtures	Accelerator
Disable	Disable	Disable	Enable

Table B2. Shotcrete mix design for each series

Series	Aggregate Max. size (mm)	Slump (cm)	Air content (%)	S/a (%)	W/C (%)	Weight per unit volume(kg/m^3)			
						Water	Cement	Sand	Coarse Aggregate
A1	13	8	2.5	65	41.5	178	482	1075	579
B1	13	12	2.5	62.4	45	212	471	996	635
B2	13	12	2.5	70	45	218	484	1144	526
B3	13	8	2.5	65	41.5	178	482	1075	579
C1	13	12	2.5	70	45	218	484	1144	526
D1	13	8	2.5	65	41.5	178	482	1075	579
D2	13	8	2.5	65	41.5	178	482	1075	579
E1	13	8	2.5	65	41.5	178	482	1075	579
E2	13	12	2.5	70	45	218	484	1144	526
F1	13	12	2.5	70	45	218	484	1144	526
F2	13	8	2.5	65	41.5	178	482	1075	579

김 재 동

1981년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사
1983년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학석사
1988년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학박사

Tel : 0361-250-6256
E-mail : jdkim@cc.kangwon.ac.kr
현재 강원대학교 공과대학 지구시스템공학과 교수

김 덕 영

1997년 강원대학교 공과대학 자원공학과, 공학사
1999년 강원대학교 공과대학 자원공학과, 공학석사

Tel : 0361-250-6256
E-mail : kimdeogyoung@dreamx.net
현재 강원대학교 대학원 지구시스템공학과 박사과정