

FRC의 휨인성 평가시 외부변형과 불안정성의 영향 및 처리방안

The Influence and Treatment Method of Extraneous Deformation & Unstability on the Flexural Toughness of FRC

김 경 수* 김 남 옥* 임 정 환** 배 주 성***
Kim, Kyoung-Soo Kim, Nam-Wook Lim, Jeong-Hwan Bae, Ju-Seong

Abstract

This study discusses the issues related to the accuracy of deflection measurement and unstable energy in the testing of FRC. Some deflection methods may include large extraneous deformations. A faulty load-deflection curve will be obtained if an unstable deflection measuring system is used, and inaccurate toughness evaluation can result from this faulty curve. Some load-deflection curve of FRC may be attributed to unstable region of the load-deflection curve. If the unstable region is not correctly evaluated toughness indices from the curve would inappropriately represent true indices. In this paper, the discussion will focus on the effects of the deflection measuring system both on the measurement of the load-deflection response of FRC and the evaluation of FRC toughness and the effects of the unstable region and the management method of unstable region on toughness evaluation of FRC. It is observed that ASTM toughness indices which is based on measured deflection at first cracking is influenced significantly by extraneous deformation of deflection measurement. Extraneous deformation in deflection measurement, however result in negligible errors in toughness evaluation if JSCE and JCI definitions are used.

keywords : FRC, Extraneous deformation, Load-deflection curve, First crack, Toughness, Unstable energy

* 전북대학교 공학연구원 공업기술연구센터 연구원

** 전주공업대학 토목과 교수

*** 전북대학교 공과대학 사회기반시스템공학과 교수
전북대학교 공학연구원 공업기술연구센터

E-mail : kks1382@hanmail.net 011-689-1382

• 본 논문에 대한 토의를 2002년 9월 30일까지 학회로 보내
주시면 2003년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

콘크리트는 휨, 인장 및 충격강도가 낮고 에너지 흡수능력이 작으며 매우 취성적인 성질을 개선하기 위하여 비연속성 단섬유를 콘크리트에 고르게 분산시킴으로써 에너지 흡수능력의 증가와 연성화, 충격 및 균열에 대한 저항성 증대, 균열의 조절·제어 및 균열 후 거동 등을 향상시킨 섬유보강콘크리트(FRC : Fiber Reinforced Concrete)가 개발되어 왔다.

이와 같이 섬유에 의한 성질개선을 설명하는데 사용되는 인성(Toughness)은 FRC의 에너지 흡수능력을 나타내며 파괴에 대한 FRC의 저항능력을 특정 짓는데 이용되며 이중 휨인성은 가장 보편적으로 이용되어 왔으며 일반적으로 인성이라 함은 휨인성을 나타낸다.

FRC의 휨인성은 하중-처짐관계를 기초로 하여 평가되며 이는 시험환경, 시험편의 기하학적 특성, 하중 재하율, 처짐 측정시스템, 등 시험변수 뿐만 아니라 섬유의 혼입율, 섬유의 종류, 섬유의 형태, 물-시멘트 비, 단위 시멘트량, 골재의 크기 및 단위 골재량, 혼화 재료, 양생조건, 콘크리트의 재령 등 재료적인 변수에 따라 영향을 받게 되며 측정된 하중-처짐곡선의 처리 방법에 따라 큰 차이를 나타낼 수 있다.

본 연구에서는 그 중에서도 처짐측정방법에 따라 하중 재하부분에서의 시험편 부스러짐, 하중전달장치의 탄성·비탄성 변형, 지점에서의 시험편의 흔들림 등으로 인해 발생할 수 있는 외부변형에 대해 파악하여 그 외부변형이 인성평가에 미치는 영향에 대해 고찰하고, 주로 저인성FRC에서 나타날 수 있는 불안정영역에 따른 인성의 차이를 파악해 불안정영역의 처리방법에 대해 고찰하고자 한다.

2. FRC의 인성평가방법

2.1 ACI Committee 544 Recommendation

ACI-781)은 3등분 하중법에 의한 휨시험을 실시하였으며, 중앙처짐이 1.9mm (0.075inch)인 점에 대응하는 하중-처짐곡선의 아래 부분의 면적과 초기균열 처짐까지의 면적의 비로 인성지수를 정의하였다. 또한

ACI-882)에서는 전체 인성지수 I_t 는 섬유를 보강한 시험편과 보강하지 않은 시험편에 대해 하중이 0이 될 때까지 흡수된 에너지의 비로써 정의하였다.

2.2 ASTM C 1018

ASTM C 1018^{3),4),5)}에서는 3등분하중법에 의한 휨시험을 통해 Fig. 1과 식 1을 이용해 인성지수를 구하였다.

$$\begin{aligned}
 I_5 &= AREA_{OACDBO} / AREA_{OABO} \\
 I_{10} &= AREA_{OAEFBO} / AREA_{OABO} \\
 I_{20} &= AREA_{OAGHBO} / AREA_{OABO} \\
 I_{30} &= AREA_{OAIJBO} / AREA_{OABO} \\
 I_{50} &= AREA_{OAKLBO} / AREA_{OABO}
 \end{aligned} \tag{1}$$

또한 잉여강도계수(Residual strength factor)를 다음과 같이 정의하였다.

$$R_{m,n} = C(I_n - I_m) \tag{2}$$

$$\text{여기서, } C = \frac{100}{n-m}, \quad n > m$$

따라서,

$$\begin{aligned}
 R_{5,10} &= 20(I_{10} - I_5) & R_{10,20} &= 10(I_{20} - I_{10}) \\
 R_{20,30} &= 10(I_{30} - I_{20}) & R_{30,50} &= 5(I_{50} - I_{30})
 \end{aligned}$$

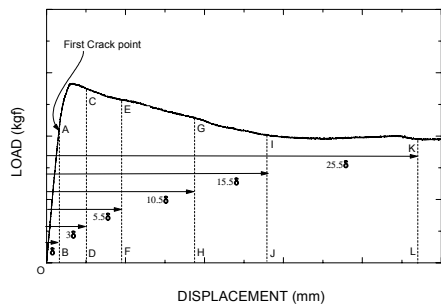


Fig. 1 Definition of ASTM toughness indices

2.3 JSCE SF-4와 JCI SF-4

JSCE SF-4⁶⁾와 JCI SF-4⁷⁾에서의 인성은 시험편에 대해서 3등분하중법에 의한 휨시험을 실시하여 얻어진 곡선의 아래 면적을 이용하여 산정한다. 휨인성(TJSCE)은 하중-처짐곡선상에서 지간 1/150처짐까지의 면적으로 계산하며, 휨인성계수(FJSCE)는 휨인성을 고려한 등가휨강도의 형태로 나타나게 된다.

$$T_{JSCE} = T_b = AREA_{1/150} \quad (3)$$

$$F_{JSCE} = \bar{\sigma}_b = \frac{T_b}{\delta_b} \cdot \frac{L}{BH^2}$$

3. 처짐측정방법

FRC의 인성시험을 수행하는데 있어서 종래에는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 시험편의 압축면에 대해 LVDT를 부착하여 처짐을 측정하였으나 이러한 처짐 측정방법은 지점부에서 시험편의 부분적인 파쇄에 의한 국부변형, 하중재하장치의 탄성·비탄성변형, 시험초기에 나타나는 시험편의 흔들림 등의 영향으로 인해 나타나는 외부변형을 포함하고 있으며, 이러한 외부변형이 포함된 불완전한 하중-처짐곡선을 근거로 하여 평가되는 인성파라미터는 정확한 인성치라고 할 수 없다.

이러한 외부변형을 제거한 순수한 처짐을 측정하기 위해 Fig. 3에 나타난 바와 같이 한쪽 지점위의 시험편 중립축에 회전가능한 힌지를 설치하고 다른 한쪽은

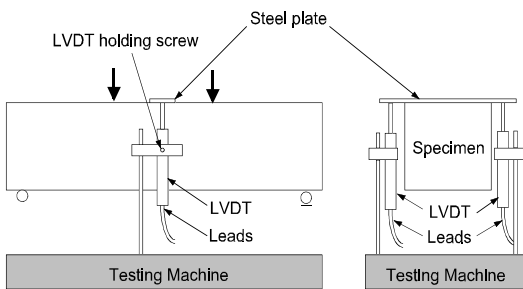


Fig. 2 Deflection measuring system which includes extraneous deformation

이동단으로 하기 위해 편위로 수평이동이 가능한 지지보를 설치한 방법으로 두 개의 LVDT를 지간의 중앙 양측면에 부착시켜 처짐을 측정하는데 이 방법을 yoke방식이라 한다.

이러한 처짐측정방법은 외부변형을 제거한 순수한 하중-처짐곡선을 이용해 에너지를 계산함으로써 시험시 시험편이 흡수한 진정한 에너지를 평가할 수 있다.

4. 저인성 섬유보강콘크리트의 거동

하중-처짐곡선에서 나타나는 불안정영역은 충분한 인성을 가지지 못하는 저인성 시험편에 대해 시험을 실시하거나 충분한 강성을 가지지 못하는 하중장치를 이용하였을 때 주로 나타나게 되는데 최근에는 하중장치의 발달로 인해 불안정영역은 주로 저인성 시험편에 대해 시험을 실시하였을 때 나타나게 된다.

저인성 시험편의 경우 시험을 실시하는 동안 하중은 시험편이 받을 수 있는 만큼의 하중으로 지속적으로 높아지며 균열은 시험편 내부에서 불안정하게 진전하여 최대하중에 이르러 급격하게 하중이 감소하게 된다.

이러한 현상은 하중장치에 저장된 에너지가 순간적으로 방출되기 때문에 판단되며 방출된 에너지는 시험편에 흡수되어 균열의 불안정한 진전이 가속되어 시험편의 파괴단계로 나타난다. 따라서 이러한 순간적인 에너지의 방출은 하중-처짐곡선 측정에 큰 영향을 미칠 수 있으며 이렇게 해서 나타나는 불안정영역은 불안정파괴를 나타낸다.

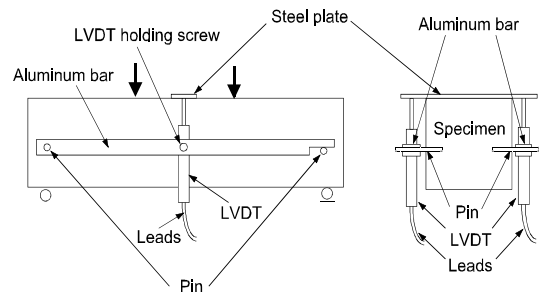


Fig. 3 Deflection measuring system which excludes extraneous deformation

하중-처짐곡선의 불안정영역에서 하중은 급속히 떨어지게 되며 처짐은 순간적으로 증가하게 되는데 이러한 현상은 순간적으로 발생하기 때문에 실제적인 하중-처짐거동을 측정한다는 것은 불가능하다. 이러한 현상을 저인성 시험편에서 발생하는 불안정성이라 표현하고 여기서 나타나는 영역을 불안정영역(unstable region)이라 하며, 불안정영역이 시작되는 점을 불안정하중(unstable load), 불안정영역이 끝나는 점을 안정하중(stable load)이라 표현한다. 또한 이 두 점 사이를 불안정 하중변화구간(unstable load variation)이라 표현한다. 이에 대한 자세한 설명은 Fig. 4에 나타나 있다.

FRC에 작용하는 하중이 최대치에 도달한 후 불안정 하중점까지 약간의 하중감소경향을 보이는데 이 때 시험편에서는 수많은 미세균열이 진전하기 시작하며, 만약 균열선단에서의 국부응력이 임계값보다 크게 되면 이들은 불안정 성장을 시작하게 되어 좀 더 큰 처짐이 발생하며 시험편의 하중저항능력은 급격히 저하하게 된다. 이러한 불안정이 발생하게 되면 두 가지를 고려해야 하는데 첫 번째는 불안정 균열진전이 발생한다 하더라도 시험편은 불안정 균열진전에 대한 최소한의 저항능력을 가지고 있으며 시험편이 완전파괴가 일어나지 않는 한 어느 정도의 하중저항능력을 가지고 있다는 것이며, 두 번째는 작용하중이 어느 단계까지 떨어지게 되면 불안정 균열 선단에서의 국부응력은 임계값보다 작아지게 되며 불안정 균열전파는 안정적이 된다는 것이다. 이는 외부하중이 급격히 떨어지게 되면 떨어진 외

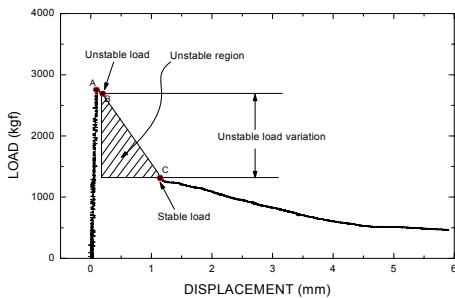
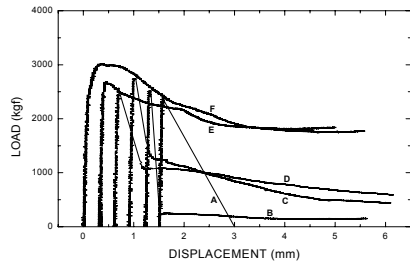


Fig. 4 Unstable region in a load-deflection curve

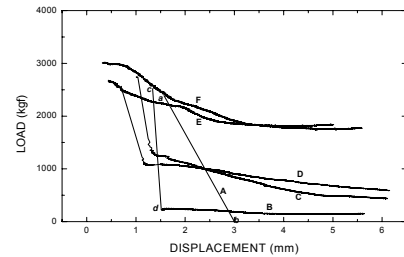
부하중은 시험편이 견딜 수 있는 저항치와 같게 되므로 하중능력은 안정적이 된다고 말할 수 있다.

Fig. 5 (a)는 시험을 통해 취득한 여러 하중-처짐곡선 중에서 무보강콘크리트 및 거동이 각기 다른 FRC 6종류의 시험편에 대해 도시한 것이며 (b)는 최대하중 이후 하중감소부분의 하중-처짐관계를 도시한 것이다. 이를 살펴보면 무보강콘크리트 시험편으로부터 얻은 곡선A는 외부하중과 방출된 에너지에 대하여 보강을 하지 않은 상태이므로 균열의 불안정성장을 가져오게 되며 작용하중은 최대하중 이후 급속하게 떨어지게 된다. 불안정영역의 시작점인 a는 최대하중 직후에 나타나게 되며 끝점인 b에서는 시험편이 완전히 파괴된다. 즉 곡선A의 하중감소부분은 전체가 불안정영역이 되는 것이다.

곡선B는 섬유 보강으로 인해 무근콘크리트에 나타나지 않은 안정하중이 나타났으며 작용하중이 많이 떨어진 낮은 하중정도에서 하중-처짐곡선은 안정화가 나타났다.



(a)



(b)

Fig. 5 Typical load-deflection curves

즉 하중은 c에서 d로 불안정하중의 약 90%정도가 떨어졌으며 이러한 불안정 이후에 비로소 하중-처짐곡선이 안정화를 이루었다. 곡선C와 D는 전체적으로 B와 비슷한 양상이 나타났으나 상대적으로 불안정영역은 크게 줄어들었다. 이렇게 안정하중이 높으면 높을수록 불안정영역은 점점 작아지게 되며 이러한 현상은 섬유 혼입율이 높을수록 더욱 뚜렷하게 나타나다가 어느 정도 이상의 섬유혼입율인 경우 불안정현상은 나타나지 않게 된다.

5. 시험편 제작 및 시험

본 연구에서는 무보강콘크리트 (Unreinforced Concrete), 강섬유보강콘크리트(SFRC), 폴리프로필렌섬유보강콘크리트(PFRC)시험편에 대하여 3등분하중법에 의한 휨시험을 실시하였다.

5.1 사용재료

본 시험에서는 S사의 비중 3.15인 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였고, 잔골재는 비중 2.564인 강모래를, 굵은 골재는 비중 2.512, 최대치수 25mm인 강자갈을 사용하였다. 섬유의 혼입율이 증가함에 따라 슬럼프가 감소하므로 워커빌리티 확보를 위하여 J사의 고성능유동화제를 첨가하였다. 사용된 섬유의 형태 및 물리적 특성은 Table 1에 나타내었다. 또한 본 연구에서 사용한 배합표는 Table 2와 같다.

5.2 시험편 제작 및 시험장치

FRC 시험편의 제조는 기본적으로 JCI SF-1⁸⁾, JCI SF-2⁹⁾ 및 ASTM C 192¹⁰⁾를 기준으로 하여 제작하였다.

Table 1 Characteristics of fibers

분류	길이 (mm)	직경 (mm)	형상비 (l/d)	비중	형태	인장강도 (kgf/cm ²)	탄성계수 (kgf/cm ²)
Steel fiber	30	0.5	60	7.85	Hooked type	11,000	2,000,000
PP fiber	19	-	-	0.9	Fibrillated type	3,500~7,700	35,000

Table 2 Mixing proportions of fiber reinforced concrete

분류	섬유 길이 (mm)	시험편	섬유 혼입율 (vol. %)	W/C (%)	배합비 (kg/m ³)					
					물	시멘트	잔골재	굵은골재	고성능 유동화제	섬유
Unreinforced concrete			0	50	170	340	714	1121	0	0
SFRC	30	S30-050	0.50	50	170	338	710	1116	3.380	39
		S30-075	0.75		169	337	708	1113	5.055	59
		S30-100	1.00		169	336	706	1111	6.720	78
		S30-150	1.50		168	333	702	1106	9.990	117
PFRC	19	P19-010	0.10	50	170	340	713	1119	0.680	0.9
		P19-030	0.30		170	339	712	1117	2.034	2.7
		P19-050	0.50		170	338	710	1115	3.380	4.5

S30-050

- 섬유 혼입율(0.50%, 0.75%... etc.)
- 섬유 길이(30mm, 19mm)
- 섬유 종류(steel fiber, P.P. fiber)

본 연구에서의 하중재하방식은 변위조절방식을 택하여 시험편 지간의 1/1500로 시험을 실시하였고 시험편의 처짐을 측정하기 위해서 10mm 용량의 LVDT를 사용하였다.

6. 시험결과

6.1. 외부변형이 미치는 영향

6.1.1 하중-처짐곡선에 미치는 영향

Table 3을 보면 외부변형을 포함한 곡선의 초기균열처짐, 외부변형을 제거한 초기균열처짐 그리고 식 4을 근거로 산출한 이론적인 초기균열처짐이 나타나 있다. 시험편의 이론적인 초기균열처짐은 약 0.030~0.050mm이며 이러한 이론적 초기균열처짐은 외부변형을 제거한 실험적 초기균열처짐과 비교했을 때 거의 동일하게 나타나고 있다. 하지만 외부변형을 포함한 초기균열처짐은 외부변형을 제거한 초기균열처짐이나 이론적 초기균열처짐보다 약 6~20배 정도 크게 나타나 그 차이가 매우 크다는 것을 알 수 있다. 이론초기균열처짐은 ASTM C 1018⁴⁾에 의해 식(4)와 같이 구할 수 있다.

$$\delta = \frac{23PL^3}{1296EI} \times \left[1 + \frac{216H^2(1+\mu)}{115L^2} \right] \quad (4)$$

여기서,

δ = theoretical first crack deflection

P = first crack load

L = span

E = elasticity modulus of the concrete

I = cross sectional moment of inertia

H = specimen depth

μ = Poisson's ratio

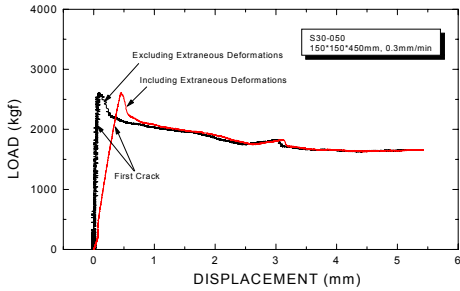
Fig. 6은 강섬유혼입을 0.5%, 1.0%의 외부변형을 포함한 하중-처짐곡선과 외부변형을 제거한 하중-처짐곡선을 나타내고 있다. 이를 비교한다면 큰 차이를 나타내고 있으며 외부변형을 포함한 곡선은 정확한 재료의 거동을 나타내지 못한다는 것을 보여준다. 이러한 외부변형은 최대하중 이전에는 상당히 큰 부분을 나타내고 있지만 최대하중 이후에는 시험편의 순수처짐이 하중이 감소함에 따라 빠르게 증가하기 때문에 상대적으로 적은 부분을 차지하게 된다.

6.1.2 ASTM 인성파라미터에 미치는 영향

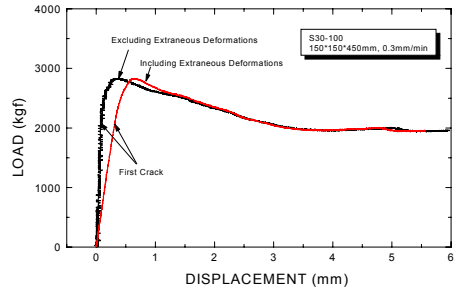
Table 4에는 ASTM 인성파라미터의 시험결과가 나타나 있으며 이들 결과값들은 외부변형의 포함 여부에 따라 큰 차이를 보이고 있다. 외부변형을 포함한 초기균열처짐은 외부변형을 제거한 초기균열처짐보다 약 6배에서 20배까지 크게 나타나게 되며, 이러한 초기균열처짐의 차이로 인해 외부변형을 포함한 곡선으로부터 얻어진 ASTM 인성지수와 ASTM 잉여강도계수는 외부변형을 제거한 곡선으로부터 얻어진 수치보다 작게 나타나게 된다.

Table 3 First crack deflection about different deflection measurement

시험편	초기 균열 강도 (kgf/cm ²)	극한 강도 (kgf/cm ²)	이론적 초기균열 처짐 (mm)	외부변형을 제거한 초기균열 처짐 (mm)	외부변형을 포함한 초기균열 처짐 (mm)
unrein -forced	26.66	32.10	0.045	0.034	0.477
S30-050	27.09	34.85	0.042	0.035	0.327
S30-075	27.17	35.75	0.045	0.046	0.257
S30-100	27.79	37.65	0.047	0.046	0.305
S30-150	27.96	40.22	0.049	0.047	0.370
P19-010	27.86	33.59	0.027	0.034	0.590
P19-030	29.41	35.00	0.032	0.035	0.750
P19-050	30.35	36.54	0.046	0.049	0.268



(a) Load-deflection curve for 0.50% steel fiber content



(b) Load-deflection curve for 1.00% steel fiber content

Fig. 6 Load-deflection curve for different fiber type and fiber content

Table 4 Effects of extraneous deformation on ASTM toughness parameters

시험편	섬유 혼입율 (Vol. %)	외부변형을 제거할 때							외부변형을 포함할 때						
		I ₅	I ₁₀	I ₂₀	I ₃₀	R _{5,10}	R _{10,20}	R _{20,30}	I ₅	I ₁₀	I ₂₀	I ₃₀	R _{5,10}	R _{10,20}	R _{20,30}
S30-050	0.50	5.4	11.6	22.6	33.0	124	110	104	4.7	10.5	19.5	27.7	116	90	82
S30-075	0.75	4.5	11.4	24.0	36.2	138	126	122	4.4	10.0	18.4	26.1	112	84	77
S30-100	1.00	4.4	10.9	24.7	38.1	130	138	134	4.2	10.0	22.9	32.4	116	129	95
S30-150	1.50	4.7	11.4	25.7	40.1	134	143	144	4.5	10.1	21.2	29.4	112	111	82
P19-010	0.10	5.3	6.8	8.4	9.8	30	16	14	2.2	2.8	-	-	12	-	-
P19-030	0.30	5.5	7.1	10.5	13.8	32	34	33	3.1	4.5	-	-	28	-	-
P19-050	0.50	4.6	7.6	13.1	18.4	60	55	53	3.1	5.0	7.8	9.7	38	28	19

그 이유를 살펴보면 ASTM 인성지수는 초기균열처짐 n배에 의해 결정된 규정처짐까지의 하중-처짐곡선 면적을 초기균열처짐까지의 면적으로 나누어 결정하는데 외부변형이 포함된 초기균열처짐은 순수처짐보다 약 6~20배 정도 크게 나타나므로 초기균열까지의 곡선면적으로 나타나는 분모는 규정처짐까지의 곡선면적으로 나타나는 분자가 외부변형의 영향으로 증가하는 비율보다 훨씬 크게 증가함으로서 전체적인 인성치는 작게 나타나는 것이다. 따라서 외부변형을 포함한 하중-처짐곡선으로부터 얻어진 ASTM인성파라미터는 FRC의 인성을 평가하는데 있어서 큰 오차를 포함한 합리적이지 못한 결과라고 할 수 있다.

6.1.3 JSCE 인성파라미터에 미치는 영향

JSCE 인성파라미터는 하중-처짐곡선상에서 초기균열점 선정에 따른 오차가 발생하지 않으며 외부변형에 큰 영향을 받지 않기 때문에 인성평가에 대해서 상당한 안정성을 가지고 있다고 할 수 있다.

Table 5에서 보는 바와 같이 JSCE인성파라미터는 SFRC의 경우 외부변형을 포함함에 따라 약간의 감소하는 경향을 보이기는 하지만 그 영향은 ASTM 인성파라미터에 비해 미비하다는 것을 알 수 있으며, PFRC의 경우 SFRC와는 반대로 외부변형을 포함함으로써 약간의 증가 경향을 나타냈는데 그 이유는 최대하중점까지의 하중증가부분의 거동이 SFRC와는 달

Table 5 Effects of extraneous deformation on JSCE toughness parameters

시험편	섬유 혼입율 (Vol. %)	외부변형을 제거할 때		외부변형을 포함할 때	
		T _{JSCE} (kg·cm)	F _{JSCE} (kg/cm ²)	T _{JSCE} (kg·cm)	F _{JSCE} (kg/cm ²)
S30-050	0.50	589.0	26.2	563.2	25.0
S30-075	0.75	639.9	28.4	625.6	27.8
S30-100	1.00	721.0	32.0	687.2	30.6
S30-150	1.50	731.8	32.5	685.8	30.5
P19-010	0.10	73.4	3.3	110.7	4.9
P19-030	0.30	148.8	6.6	180.3	8.0
P19-050	0.50	292.6	13.0	312.4	13.9

리 상당한 비선형적인 거동으로 처짐이 크게 발생함에 따라 최대하중점까지의 에너지 흡수가 외부변형을 제거한 하중-처짐곡선보다 크게 나타나기 때문이다.

그러나 외부변형이 미치는 전체적인 면을 비교할 때 ASTM 인성파라미터보다는 JSCE 인성파라미터가 외부변형에 큰 영향을 받지 않고 시험편이 가지는 에너지 흡수능력을 좀 더 정확하게 측정할 수 있는 인성평가 방법이라고 판단된다.

6.2 불안정 영역이 미치는 영향

불안정영역을 포함한 하중-처짐곡선은 시험편의 순수한 하중-처짐관계라 볼 수 없다. 따라서 이러한 불안정성이 합리적으로 처리되지 않고 포함된 상태에서 인성파라미터를 계산하게 된다면 시험편이 가지는 진정한 인성평가를 할 수 없다는 것은 당연한 것이다.

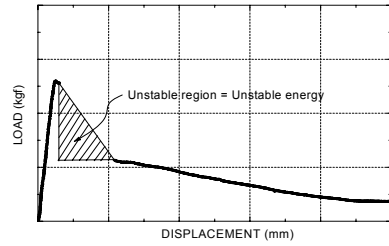
불안정영역, 즉 불안정에너지를 포함하여 산출한 인성파라미터는 실제 인성파라미터보다 훨씬 크게 나타나게 되며 불안정 에너지를 제외시켜 산출한 인성지수는 실제 인성지수보다 작게 나타나게 된다.

이렇게 불안정 에너지를 포함하느냐, 제외하느냐에 따라 나타나는 인성의 차이는 저인성 FRC일수록 더욱 크게 나타나게 되며, 만약 저인성 FRC에서 이러한 불안정에 대한 문제가 합리적인 방법으로 해결되지 않는다면 불안정에너지를 포함한 하중-처짐곡선으로부터 얻어진 인성파라미터는 의미가 없는 잘못된 값을 나타내게 된다. 그러나 불안정 영역에서의 실제적인 하중-처짐곡선의 거동 측정이 불가능하여 추정할 수 밖에 없는 실정으므로 본 연구에서는 삼각형의 형태로 나타나는 불안정 영역을 제거한 후 인성파라미터를 산출하여 시험편의 인성거동에 대한 안정성을 고려하였다.

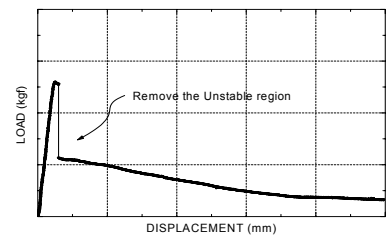
즉 Fig. 7의 (a)와 같은 불안정 영역을 갖는 하중-처짐거동을 불안정 현상으로 인해 나타난 처짐의 증가를 제거한 (b)와 같은 하중-처짐 거동으로 파악하여 인성평가를 실시하였다.

6.2.1 ASTM 인성파라미터에 미치는 영향

불안정영역을 포함하고 있는 Fig. 8를 보면 D점과 L점을 이용한 곡선DFIL과 곡선DEGJL사이 어느곳



(a)



(b)

Fig. 7 Remove method of the unstable region in this study

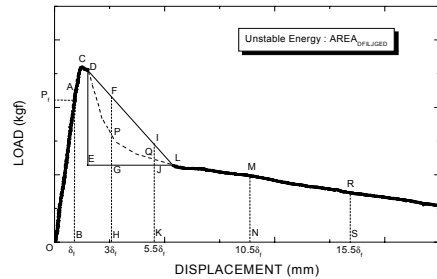


Fig. 8 Effects of instability on ASTM toughness parameters

이든지 실제적인 하중-처짐관계가 나타날 수 있으며, 이러한 경우 인성을 평가하게 되면 불안정영역에서 하중-처짐관계를 확인할 수 없기 때문에 가정한 하중-처짐관계에 따라 인성은 과대평가되거나 또는 과소평가될 수 있다. 즉, 하중-처짐곡선에서 곡선 DFIL은 불안정곡선을 나타내며 점D와 점L을 잇는 실제적인 시험편의 거동을 파악하지 못한 상태이고 이 상태에서

ASTM인성지수의 산출은 어떻게 거동을 추정하느냐에 따라 다소의 차이가 있을 뿐 불안정에너지를 포함하고 있다.

예를 들어 인성지수 I5계산에서 분자는 면적 DF_{GED}의 불안정에너지를 포함하고 있으며 I10은 면적 DF_{IJGED}로부터 계산된 불안정에너지를 포함하고, I20이나 그 이상의 인성지수는 불안정에너지 전체를 포함하고 있다. 또한 OABO의 면적으로 계산되는 ASTM인성지수의 분모는 일정하게 고정된 수치를 나타내고 있으므로 FRC의 ASTM인성지수 평가시 불안정에너지에 의해 발생하는 오차는 상당히 크게 나타난다. 이와 같은 현상은 시험결과로부터 확인할 수 있다. Table 6을 보면 ASTM인성파라미터에 대해 불안정에너지의 포함 여부에 따른 결과가 나타나 있다.

Table 6에서 보는 바와 같이 섬유혼입률에 관계없이 불안정 에너지를 포함하느냐 제거하느냐에 따라 각각의 인성지수마다 차이를 보이고 있으며 I30과 I50 같은 경우에는 거의 2배의 차이를 보이고 있다. 이렇듯 불안정성에 따라 큰 차이를 보이고 있는 저인성 FRC에 대해 시험편의 실제거동을 측정할 수 있다면 진정한 인성평가를 실시할 수 있지만 시험편의 실제거동을 측정할 수 없으므로 불안정영역을 제거한 후 인성을 평가하는 것이 안전성 측면에서 타당하다고 판단 된다.

Table 6 Effects of instability on ASTM toughness parameters

	P19-010		P19-030		P19-050	
	불안정 에너지 제거시	불안정 에너지 포함시	불안정 에너지 제거시	불안정 에너지 포함시	불안정 에너지 제거시	불안정 에너지 포함시
I ₅	5.3	5.3	5.5	5.5	4.6	4.7
I ₁₀	6.8	8.8	7.1	9.8	7.6	9.5
I ₂₀	8.4	15.3	10.5	18.6	13.1	17.3
I ₃₀	9.8	16.8	13.8	27.3	18.4	22.9
I ₅₀	12.7	19.7	20.0	38.7	28.0	33.2
I ₁₀₀	19.1	26.4	33.3	54.1	47.1	54.0
R _{5,10}	30	70	32	86	60	96
R _{10,20}	16	65	34	88	55	78
R _{20,30}	14	15	33	87	53	56
R _{30,50}	15	15	31	57	48	52
R _{50,100}	13	13	27	31	38	42

6.2.2 JSCE 인성파라미터에 미치는 영향

시간의 1/150처짐까지의 하중-처짐곡선 아래의 에너지를 이용하는 JSCE 인성파라미터는 인성이 작은 저인성FRC 시험시에 발생하는 불안정에너지의 포함 여부에 따라 상당한 차이를 나타나게 된다.

Table 7을 보면 ASTM 인성파라미터와 마찬가지로 불안정에너지를 포함함에 따라 시험편마다 차이를 보이기는 하지만 인성치는 전체적으로 크게 평가되어 불안정에너지를 제외한 인성치와 상당한 차이를 보이고 있는 것으로 나타났으며 특히 섬유 혼입률 0.3%의 경우는 불안정 영역을 포함한 경우 그렇지 않은 경우에 비해 약 1.5배나 크게 나타났다. 따라서 본 평가방법을 이용해 FRC의 인성을 평가할 경우 안전성 측면을 고려하여 불안정 에너지를 제거한 후 인성평가를 실시하는 것이 타당하다고 판단된다.

Table 7 Effects of instability on JSCE toughness parameters

Series	Fiber content (Vol. %)	불안정에너지 제거시		불안정에너지 포함시	
		T _{JSCE} (kgf·cm)	F _{JSCE} (kgf/cm ²)	T _{JSCE} (kgf·cm)	F _{JSCE} (kgf/cm ²)
P19-010	0.10	73.4	3.3	94.7	4.2
P19-030	0.30	148.8	6.6	224.8	10.0
P19-050	0.50	292.6	13.0	334.8	14.9

7. 결 론

- 1) 하중-처짐곡선의 측정은 처짐측정장치에 의해 상당히 큰 영향을 받게 되며 하중-처짐곡선상에서 볼 때 상대적으로 초기균열 이후보다 초기균열 이전에 상당히 큰 오차를 포함하게 된다.
- 2) ASTM C 1018의 인성파라미터는 외부변형의 포함 여부에 따라 상당히 큰 차이를 나타냈으나, JSCE SF-4의 인성파라미터는 ASTM C 1018의 인성파라미터에 비해 외부변형의 영향을 적게 받는 것으로 나타나 상대적으로 외부변형에 대해 안정성을 가지고 있다고 판단된다.
- 3) 불안정영역에서의 실제적인 하중-처짐 거동 측정이

불가능하여 추정할 수 밖에 없으며, 시험분석 결과 ASTM과 JSCE인성과파라미터는 불안정영역의 포함여부에 따라 상당히 큰 차이를 보이고 있다.

- 4) 시험편의 에너지 흡수능력에 대한 안정성 측면을 고려한다면 삼각형의 형태로 나타나는 불안정영역을 제거한 후 인성을 평가하는 것이 타당하다고 판단된다.

참고문헌

1. ACI Committee 544, "Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete", ACI Materials Journal, July 1978, pp. 283~289.
2. ACI Committee 544, "Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete", ACI Materials Journal, 1988, pp. 583~593.
3. ASTM C 1018-89, "Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of fiber Reinforced concrete (Using Beam with Third-Point Loading)", ASTM Standards, America Standard for Testing and Materials, pp. 507~513.
4. ASTM C 1018-94b, "Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading)".
5. ASTM C1018-84, "Standard Test Method for Flexural Toughness of Fibre Reinforced Concrete", 1984 ASTM Standards, ASTM, Philadelphia, pp. 637~644.
6. JSCE SF-4, "Method of Tests for Flexural Strength and Flexural Toughness of Steel Fiber Reinforced Concrete", JSCE(Japan Society of Civil Engineers), 1984, pp. 58~61.
7. (社)日本コンクリート工學協會 "鋼纖維補強コンクリートの曲げ強度及び曲げタフネス試験方法" JCI SF-4, pp 84~88.
8. (社)日本コンクリート工學協會 "實驗室における鋼纖維補強コンクリートの作り方" JCI SF-1, pp 77~79.
9. (社)日本コンクリート工學協會 "鋼纖維補強コンクリートの強度及びタフネス試験用供試体の作り方" JCI SF-2, pp 80~83.
10. ASTM C 192, "Method of Making and Curing Concrete Testing Specimen in the Laboratory", ASTM Standards, 1991, pp. 144~153.

(접수일자 : 2002년 4월 10일)