



## 균열손상 후 동결융해를 경험한 철근콘크리트 보의 휨거동

김선우<sup>1)</sup> · 최기봉<sup>2)</sup> · 윤현도<sup>3)\*</sup>

<sup>1)</sup>충남대학교 건축연구소 <sup>2)</sup>경원대학교 건축학과 <sup>3)</sup>충남대학교 건축공학과

## Effect of Freeze-Thaw Cycles after Cracking Damage on the Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams

Sun-Woo Kim,<sup>1)</sup> Ki-Bong Choi,<sup>2)</sup> and Hyun-Do Yun<sup>3)\*</sup>

<sup>1)</sup>Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

<sup>2)</sup>Dept. of Architecture, Kyungwon University, Sunnam 461-200, Korea

<sup>3)</sup>Dept. of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

**ABSTRACT** The flexural behaviors of two types of beam members exposed to freeze-thaw cycles were evaluated. This study aims to examine the effect of freeze-thaw cycles on the behavior characteristics of reinforced concrete (RC) beams. For the purpose, a part of the beam specimens were damaged until yielding of tension reinforcement was reached, before they were exposed to 150 and 300 cycles of freeze-thaw. Cyclic tests, as well as monotonic tests, were conducted to evaluate the stiffness degradation characteristics when same cycle is repeated. The material tests showed that relative dynamic modulus of concrete exposed to 300 cycles of freeze-thaw moderately decreased to 86.8% of normal concrete, indicating that concrete used in this study has good durability against freeze and thaw damage. The results of monotonic tests showed reduction of flexural strength, ductility and stiffness of the beam specimens exposed to freeze-thaw cycles compared with those of the control specimens. In particular, BDF13 specimens, which had been subjected to artificial cracking damage, did not showed enough flexural strength to satisfy nominal moment required by current concrete structure design code. In the monotonic tests results, BF75 specimens exposed to freeze-thaw cycles showed 10% or more cyclic stiffness degradation. Therefore, it was thought that deformation of concrete in compression have to be considered in design process of members under cyclic load, such as seismic device.

**Keywords :** reinforced concrete beams, flexural behaviors, freeze-thaw cycles, cracking damage, tension reinforcement

### 1. 서 론

철근콘크리트는 다른 건설재료에 비해 높은 내구성을 지니고 있어 전 세계적으로 널리 쓰이고 있는 구조용 재료이다. 그러나 건설구조물의 특성상 외기에의 노출은 불가피하며, 이에 따라 중성화, 동결융해, 염해 등 다양한 환경적 열화를 경험하게 됨으로써 내구성이 저하된다. 특히 우리나라와 같이 4계절이 뚜렷한 지역의 구조물은 동결융해에 직접적으로 노출되어 있는 실정이며, 이와 같은 동결융해 과정에서 모세관수의 동결팽창에 의한 시멘트 겔(cement gel)의 내부 파손이 일어나게 된다. 또한 급격한 온도강하로 인하여 표면에 미세한 신축균열이 발생하며, 내부에는 급격한 모세관수의 동결에 의한 시멘트 페이스트의 파괴가 일어난다. 이러한 동결융해 작용을 받는 콘크리트의 열화 형태는 균열, 스킨링(scaling) 및 팝

아웃(pop-out) 등으로 나타나게 되며, 이는 구조물의 구조적 내구성을 저하시킴과 동시에 사용수명을 저하시킨다.<sup>1)</sup>

기상청 통계<sup>2)</sup>에 따르면, 우리나라의 겨울철 기온은 춘천이 최저  $-8.9^{\circ}\text{C}$  등 평균  $-3.7^{\circ}\text{C}$ 이며,  $0^{\circ}\text{C}$  이상과 이하를 넘나드는 콘크리트의 동결융해 횟수도 춘천에서 최대 125회 등 국내 평균 79회로 보고되어 국내의 철근콘크리트 구조물은 지역에 따른 차이만 있을 뿐, 반복적인 동결융해의 영향을 받고 있다. 이에 동결융해에 따른 콘크리트의 열화특성<sup>3-5)</sup> 및 내구성 예측<sup>6-8)</sup>을 통해 손상정도를 정량화하고자 하는 연구가 진행되고 있다. 그러나 반복적인 동결융해에 따라 발생하는 균열 및 손상은 콘크리트 재료 자체의 내구성 저하뿐만 아니라 철근콘크리트 부재의 사용성 및 내하성을 저하시킬 수 있으므로, 동결융해와 같이 열화환경에 따른 철근콘크리트 부재 성능 평가에 대한 연구가 요구된다. 한편, 보는 구조물에서 상부 하중을 하부 기둥으로 전달함과 동시에 사용성 측면에서 주요한 요소이며, 최상층 또는 1층을 주차장 용도로 사용하는 골조 구조물의 경우 동결융해에 직접적으로 노출된다. 따라서 이 연구에서는 철근콘크리트 보

\*Corresponding author E-mail : wiseroad@cnu.ac.kr

Received December 23, 2009, Revised April 7, 2010,

Accepted April 7, 2010

©2010 by Korea Concrete Institute

의 동결융해에 따른 휨거동 특성을 실험적으로 구명하고자 하였다. 이 때 실제 구조물에서 균열 발생 후 지속적인 동결융해를 받는 점을 고려하여 동결융해 이전에 균열손상을 가함으로써 내부 철근으로의 급속한 동결융해를 유도하였으며, 차후 내진구조물의 동결융해 특성 연구에 기초자료를 제시하고자 반복사이클을 통한 실험을 실시하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험체 계획

동결융해에 따른 철근콘크리트 보의 휨거동 특성을 평가하기 위해 Fig. 1 및 Table 1에 나타난 바와 같이 현행 콘크리트설계기준<sup>9)</sup>에서 요구하는 최소철근비에서 최대철근비까지 총 4시리즈의 축소모형 실험체(100×100×600 mm)를 계획하였다. 콘크리트 설계기준압축강도는 Table 2에 나타난 바와 같이 24 MPa로 배합계획하였으며, 굵은골재는 최대치수 25 mm의 쇄석을 사용하였다. 혼화제로는 AE감수제를 사용하였으며, 타설시 측정된 콘크리트의 공기량은 4.4%로 나타났다. 반복재하(cyclic loading)를 위해 D6 또는 D10 철근으로 압축 및 인장철근을 동일하게 배근하였으며, 휨항복형 파괴를 유도하기 위해 실험구간에 D6 철근을 30 mm 간격으로 전단 보강하였다. 이 때 D6 및 D10 철근의 항복강도는 각각 461 및 584 MPa이며, 탄성계수는 204 및 210 GPa로 측정되었다.

### 2.2 동결융해 시험 방법

동결융해를 받는 실험체는 콘크리트 타설 후 실온에서 1일간 양생하였으며 1주일간 증기양생(autoclave) 이후 동

Table 2 Mixture proportions

W/B	S/a	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )					
		W	C	FA	S	G	Admixture
0.54	0.49	178	280	50	856	891	1.7

결융해 환경에 노출하였다. 이 때, 동결융해시험은 KS F 2456 「급속 동결융해에 대한 콘크리트의 저항 시험 방법」<sup>10)</sup>에 준하여 B방법인 기중 급속 동결 후 수중 융해 시험 방법으로 실시하였다. 이 때 Fig. 2에 나타난 바와 같이, 1사이클은 -18~4°C의 온도조건하에서 4시간 동안 동결융해가 진행되는 것으로 하였으며, 강도특성을 평가하기 위해 철근콘크리트 보와 함께 시리즈별 3개의 압축공시체를 동일한 조건으로 시험하였다. 강도측정은 동결융해 0, 150, 300 사이클에서의 압축강도( $f_{cu}$ ) 뿐만 아니라, 1차 공명 진동수를 이용하여 동탄성계수( $E_D$ )를 측정하였으며, 동결융해 300사이클에서 동결융해 시험을 종료하였다.

강도측정 결과를 Fig. 3 및 Table 3에 나타내었다. 콘

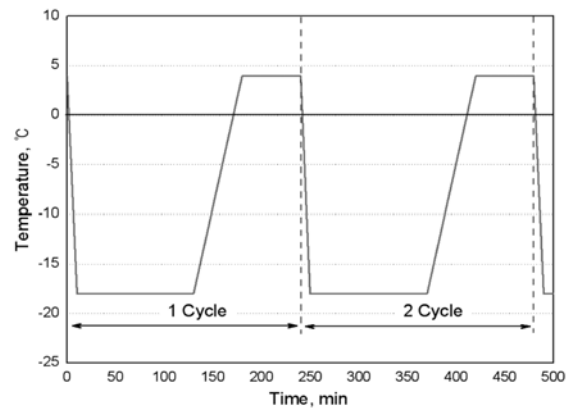


Fig. 2 Freeze-thaw cycles

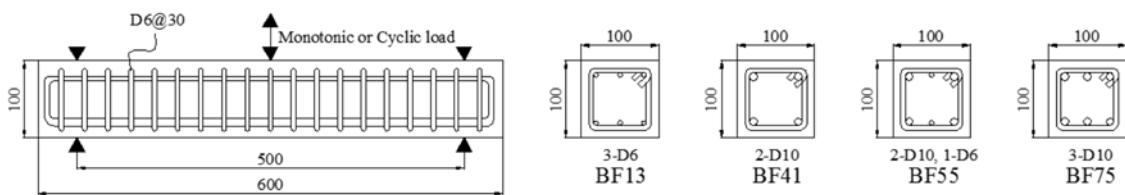


Fig. 1 Details of test specimens (unit: mm)

Table 1 Summary of specimens

Specimen series	$f_{ck}$ (MPa)	$B \times D(d)$ (mm)	$l(l_n)$ (mm)	$a/d$	Tensile reinforcement	$\rho_t$ (%)	$\rho_b$ (%)	$\rho_t/\rho_b$	Pre-cracking	Freeze-thaw cycles	
BF13	24	100×100 (90)	600(500)	2.78	3-D6	0.35	2.60	0.13	No	0, 150, 300	
BDF13									Yes		
BF41					2-D10	1.00		0.41	No		0
BDF41									Yes		
BF55					2-D10, 1-D6	1.40		0.55	No	0, 150, 300	
BDF55									Yes		
BF75					3-D10	1.90		0.75	No		0, 150, 300
BDF75									Yes		

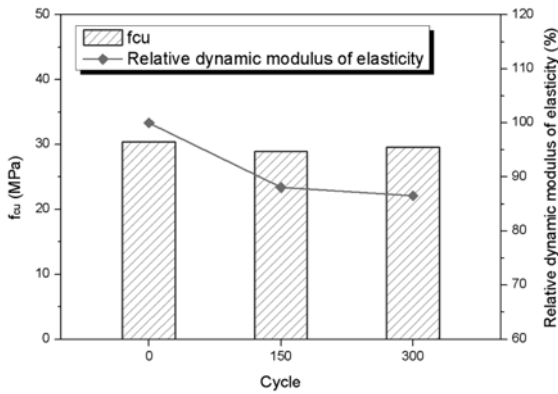


Fig. 3 Compressive strength and relative dynamic elastic modulus ( $E_D$ ) of concrete

Table 3 Mechanical properties of concrete

Freeze-thaw cycles	$f_{cu}$ (MPa)	$\epsilon_{cu}$ ( $\times 10^{-6}$ )	$E_c$ (GPa)	$E_D$ (GPa)
0	30.41	2,440	21.32	27.47
150	28.96	2,344	24.79	24.18
300	28.57	2,745	21.52	23.77

크리트 공시체의 압축강도는 동결융해 사이클 진전에 따라 각각 4.8% 및 6.1%의 강도저하특성을 보였으며, 정탄성계수( $E_c$ )는 동결융해 사이클에 따른 특성이 나타나지 않았다. 반면, 콘크리트 공시체의 동탄성계수( $E_D$ )는 동결융해 사이클이 진전됨에 따라 감소하는 특성을 보였다. 그러나 이 연구에서 계획된 최대 동결융해 사이클인 300 사이클 후의 상대동탄성계수는 KS F 2456<sup>10</sup>에서 콘크리트 내구성을 확보하기 위한 최저 상대동탄성계수인 60% 이상보다 높은 86.8%로 나타나, 이 연구에서 계획한 동결융해 사이클 내에서는 콘크리트의 내동해성 문제가 없는 것으로 사료된다.

### 2.3 실험 방법

이 연구에서는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 200 kN 용량의 만능재료시험기(UTM)를 사용하였으며, 변위제어방식(displacement control)으로 단조 또는 반복재하 하였다. 이 때, 휨 거동시 보 중앙부 처짐을 측정하기 위하여 LVDT를 사용하였다. 또한 균열손상 이후의 휨거동 특성을 평가하기 위한 실험체는 인장철근의 탄성한계치인 항복변형률까지 도달시킨 후 단조 또는 반복 재하함으로써, 균열손상 및 동결융해에 의해 발생할 수 있는 최대손상치에 대해 평가하고자 하였다. 모든 실험체는 최종 파괴가 일어날 때까지 재하되었다. 반복재하에 의한 실험방법 및 사이클은 4장의 Figs. 8 및 9에 각각 나타내었다.

## 3. 단조 재하시 실험 결과 및 분석

### 3.1 균열 및 파괴양상

Fig. 5는 실험체의 최종파괴양상을 나타낸 것이다. Fig. 5(a)

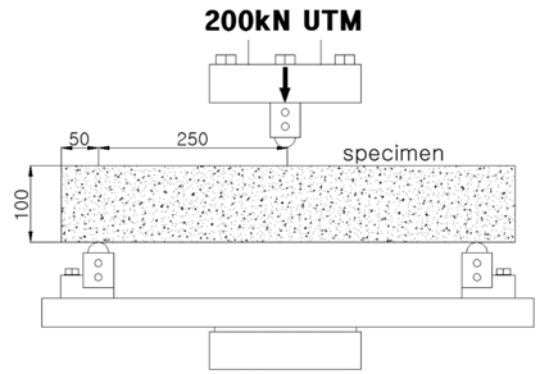


Fig. 4 Test setup for monotonic loading (unit: mm)

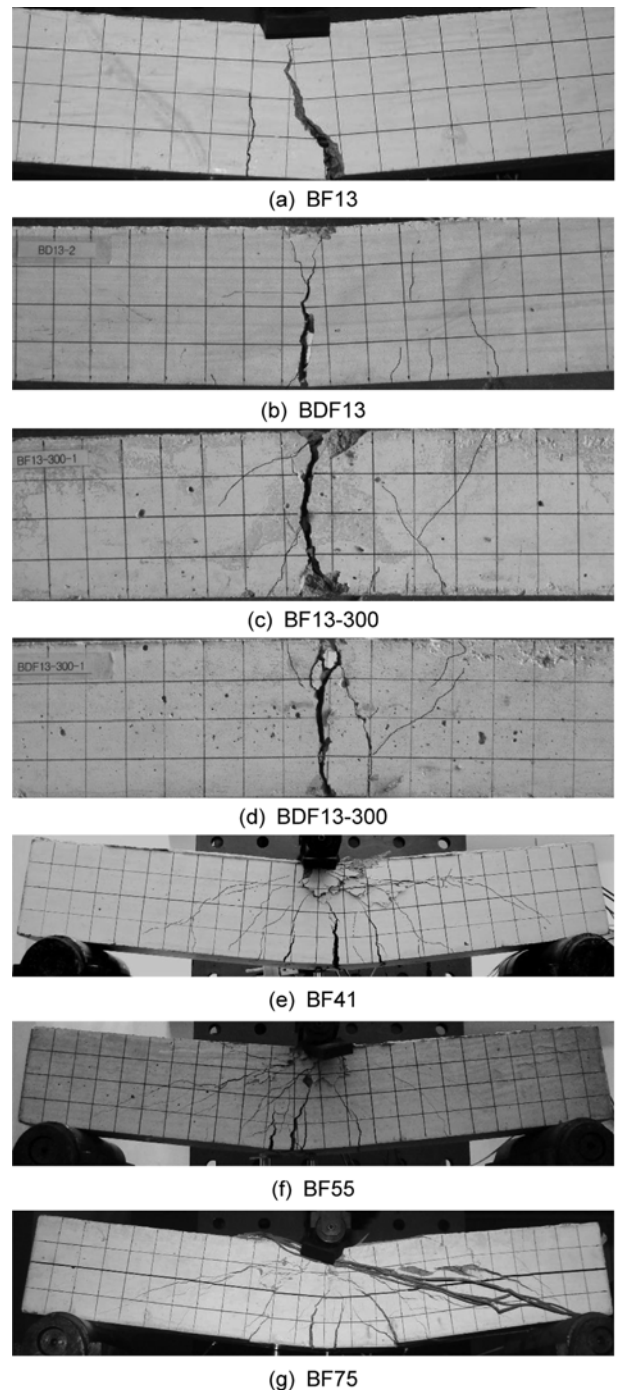


Fig. 5 Final failure at monotonic loading

에 나타난 바와 같이 BF13 실험체에서는 4.9 kN 가력시 중앙 하부에서 초기균열이 발생하였으며, 이후 처짐이 증가함에 따라 중앙부에 추가적인 균열이 발생하였으나, 최대 내력시까지 압괴 발생 없이 초기에 발생되었던 균열 폭만이 증가하여 최종 파괴되는 순수 휨인장 파괴형태를 나타내었다. 한편, Fig. 5(b)~(d)에 나타난 바와 같이 균열손상 및 동결융해 사이클을 경험한 경우, BF13 실험체보다 많은 균열개수를 보이고 있으며, 양단으로 확산되려는 경향을 나타내었다. 그러나 동결융해 사이클에 대해서는 파괴양상에 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다.

한편, Fig. 5(e)~(g)에 나타난 바와 같이  $0.41\rho_b$  이상의 인장철근비를 갖는 BF41, BF55 및 BF75 실험체에서는 중앙 하부에서 다수의 휨균열이 발생하였으며, 경간을 따라 단부로 분산되는 형태를 나타내었다. 이 때 발생한 균열들은 휨 하부로부터 가력점을 잇는 방사형태를 나타내었으며, 가력점에서의 압괴가 발생하는 등 전형적인 휨 파괴형태를 나타내었다.

### 3.2 하중-처짐 관계

Fig. 6(a)는 단조하중 재하시 초기 손상에 따른 실험체의 하중-처짐 관계를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 항복변위( $\delta_y$ )까지 손상을 가한 실험체의 내력은

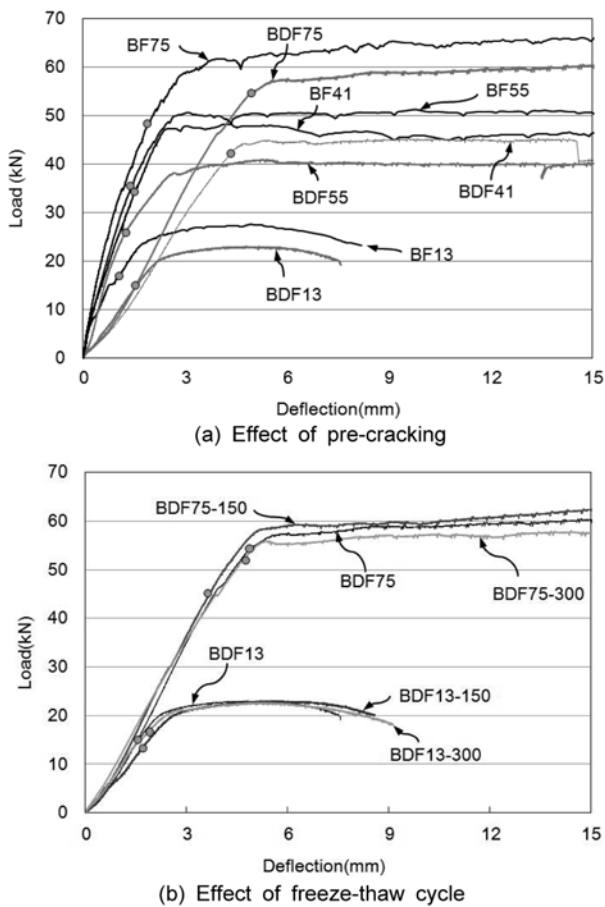


Fig. 6 Load-deflection curve

손상 이전에 비해 감소하는 것으로 나타났다. 최소철근비인  $0.13\rho_b$ 의 인장철근비를 갖는 경우, 손상을 가한 실험체는 16%의 내력저하를 보였다. 그러나 Fig. 7(a)에 나타난 바와 같이 인장철근비가 증가할수록 손상에 따른 내력 저하량이 감소하여 최대철근비인 BF75 실험체에서는 내력 차이를 보이지 않았다. Fig. 7(b)는 소성역(항복 이후 최대내력)에서의 연성을 나타낸 것으로, BF75 실험체에서는 초기 손상에 의해 4% 저하된 반면, BF13 실험체에서는 28%의 저하를 나타내었다. 한편, 인장철근 항복시 강성 또한 손상을 가한 실험체에서 전반적으로 낮게 나타났으며, BF13 및 BF41 실험체에서 각각 39% 및 57%, BF55 및 BF75 실험체에서 각각 16% 및 3%의 강성저하 특성을 보였다. 이는 휨내력과 마찬가지로 초기 손상이 전반적인 휨거동에 미치는 영향이 큰 것으로 사료된다. 특히 휨항복형 철근콘크리트 보의 주요 저항기구인 인장철근량이 감소할수록 외부 손상 및 반복 재하에 따른 내력 및 강성 저하가 증가되므로, 균열과 같은 손상에 따른 내력 저하를 방지하기 위해서는 이 연구범위 내에서  $0.55\rho_b$  이상의 철근이 필요할 것으로 판단되었다.

Fig. 6(b)는 단조하중 재하시 동결융해 사이클에 따른 실험체의 하중-처짐 관계를 나타낸 것이다. 모든 실험체에서 동결융해 사이클이 진전됨에 따라 최대하중이 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 Fig. 7(a)에 나타난 바와 같이 손상을 받은 BDF 시리즈 실험체의 동결융해에 의한 최대하중 감소량은 손상을 받지 않은 BF 시리즈 실험체에 비해 매우 적은 것으로 나타났다. 또한 이와 같은 경향은 Fig. 7(b)~(c)에 나타난 바와 같이 연성, 강성 측면에서도 유사하게 나타났다.

이는 초기 손상에 의한 내력저하가 동결융해에 의한 손상 기여분보다 크기 때문인 것으로 사료된다. Fig. 7(d)는 실험 결과를 현행 콘크리트설계기준에 따른 공칭모멘트( $M_n$ )와 비교하여 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 모든 실험체의 휨내력은 설계기준 이상인 것으로 나타났으나, 인위적 균열손상으로 인해 BDF13 실험체의 휨내력은 설계강도 이하로 감소하였으며, 동결융해 300 사이클에서는 균열손상을 받지 않은 BF13 실험체도 설계강도 이하의 휨내력을 보였다. 그러나 BF75 및 BDF75 실험체는 동결융해 300 사이클에서도 현저한 내력저하 없이 공칭강도( $M_n$ ) 이상의 휨내력을 발휘하는 것으로 나타났다. 단조가력에 따른 철근콘크리트 보의 휨거동에 관한 실험 결과를 정리하여 Table 4에 나타내었다.

## 4. 반복 가력시 실험 결과 및 분석

### 4.1 반복가력시 실험 방법

이 연구에서는 균열손상 이후 동결융해 환경에 노출되는 철근콘크리트 보의 휨거동 특성을 실험적으로 구명하고자 하였다. 반복 가력에 필요한 각 사이클 별 변위력은 단조 가력시 보의 주근에 부착된 변형률게이지의

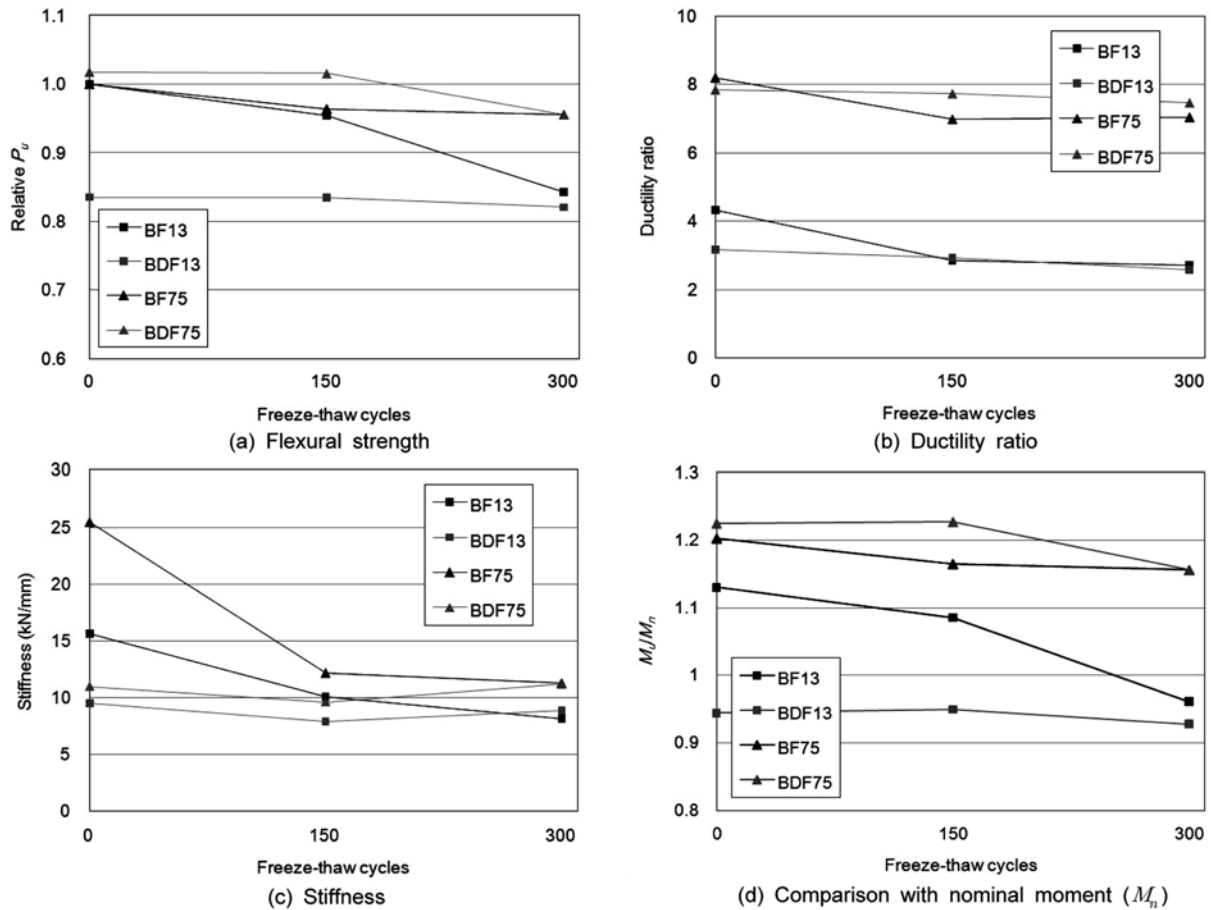


Fig. 7 Effect of freeze-thaw cycle

Table 4 Monotonic test results

Specimen	$P_y$ (kN)	$\delta_y$ (mm)	$k_y$ (kN/mm)	$P_u$ (kN)	$\delta_u$ (mm)	$k_u$ (kN/mm)	Ductility ratio*	Relative $P_n$ **	$M_n$ (kN·m)	$M_u/M_n$
BF13	17.82	1.14	15.66	27.58	4.93	5.59	4.33	1.00	6.10	1.13
BF13-150	18.59	2.00	9.31	26.31	5.25	5.01	2.63	0.95	6.06	1.09
BF13-300	15.61	1.65	9.47	23.25	5.18	4.48	3.14	0.84	6.05	0.96
BDF13	15.50	1.63	9.51	23.04	5.19	4.44	3.18	0.84	6.10	0.94
BDF13-150	13.50	1.71	7.92	23.01	6.01	3.83	3.52	0.83	6.06	0.95
BDF13-300	17.36	1.96	8.88	22.64	5.07	4.47	2.59	0.82	6.10	0.93
BF41	34.49	1.52	22.69	48.20	4.25	11.35	2.79	1.00	9.59	1.26
BDF41	42.19	4.36	9.68	45.34	9.57	4.74	2.19	0.94	9.59	1.18
BF55	35.97	1.45	24.84	51.34	9.80	5.24	6.77	1.00	11.27	1.14
BDF55	25.76	1.24	20.81	41.77	4.70	8.89	3.80	0.81	11.27	0.93
BF75	48.40	1.90	25.42	66.42	15.63	4.25	8.21	1.00	13.80	1.20
BF75-150	46.77	3.84	12.19	64.02	26.82	2.39	6.99	0.96	13.74	1.17
BF75-300	48.75	4.32	11.29	63.45	34.44	1.84	7.98	0.96	13.72	1.16
BDF75	54.95	5.00	11.00	67.61	39.22	1.72	7.85	1.02	13.80	1.22
BDF75-150	45.46	3.72	12.22	67.44	36.53	1.85	9.82	1.02	13.74	1.23
BDF75-300	51.63	4.61	11.21	63.45	34.44	1.84	7.47	0.96	13.72	1.16

\* Ductility ratio :  $\delta_u / \delta_y$

\*\* Relative  $P_n$ : Flexural strength ratio (specimen exposed to FT cycles / specimen which is not exposed to FT cycles)

측정치가 항복 변형에 이를 때의 변위(항복변위,  $\delta_y$ )의 배율로 하였으며, 실험방법을 Fig. 8에 나타내었다. 또한 동일 변위에서의 반복가력에 따른 강도 및 강성저하를 평가하기 위하여 Fig. 9에 나타난 바와 같이 동일 변위에서 2회 반복해서 가력하였다.

#### 4.2 균열 및 최종파괴양상

동결융해 사이클 이전에 각 실험체에 항복변위( $\delta_y$ )까지 균열손상을 인위적으로 도입하였으며, Fig. 10에 나타난 바와 같이 균열이 발생한 상태로 동결융해 환경에 노출되

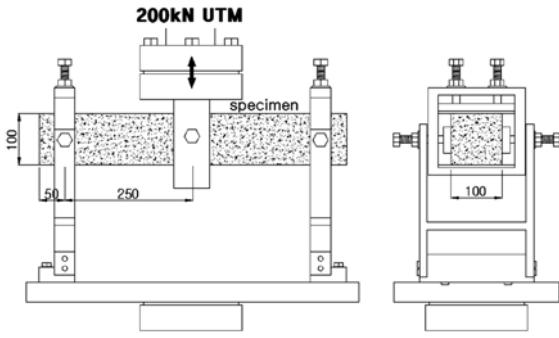


Fig. 8 Test setup for cyclic loading (unit: mm)

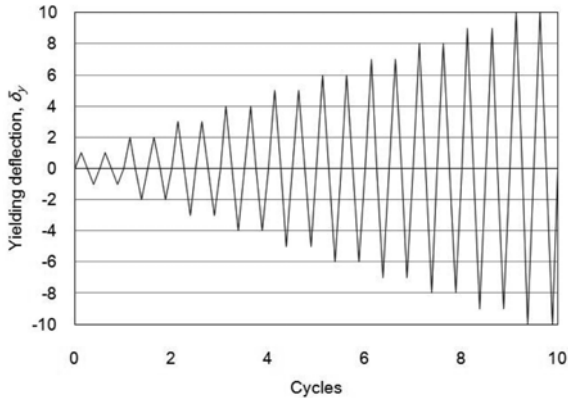


Fig. 9 Loading history

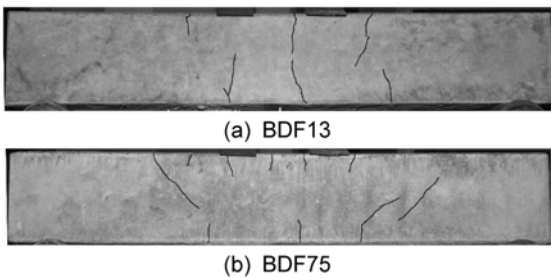


Fig. 10 Pre-cracking pattern of test specimens

도록 하였다. 반복하중 재하의 각 인장철근비를 갖는 시리즈별로 계획된 변위하중을 통해 제어하였으며, 실험 결과 나타난 균열 및 파괴양상은 Fig. 11에 나타난 바와 같다.

BDF13 시리즈 실험체에서는 동결융해 사이클에 관계 없이 반복하중이 진전됨에 따라 동결융해 전에 발생했던 균열폭만이 증가하는 경향을 보이며 최종 파괴되었다. 반면, BDF75 시리즈 실험체에서는 Fig. 11에 나타난 바와 같이 동결융해 사이클이 증가함에 따라 보의 양쪽 복부에 상부와 하부를 잇지 않는 미세균열들이 다수 발생하였으며, 최대하중을 초과한 후에도 균열이 발생하는 특성을 나타내었다.

### 4.3 하중-처짐 관계

Fig. 12는 반복하중 재하시 실험체의 하중-처짐 관계를

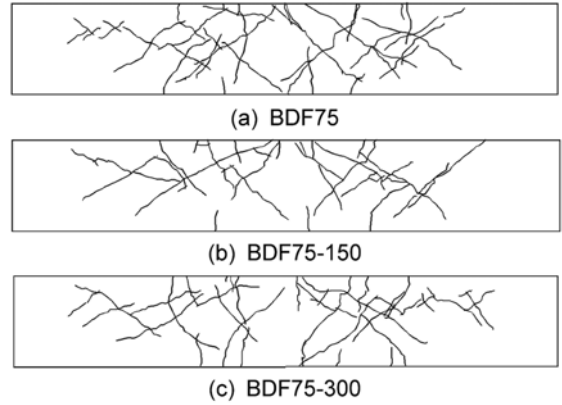


Fig. 11 Final failure of BDF75 specimens

나타낸 것이며, 실험 결과를 Table 5에 정리하여 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 모든 실험체는 반복하중을 받는 경우에도 상승곡선에서 단조하중 재하시와 유사한 강성특성을 나타내었다. 그러나 인장철근비가 낮은 BDF13 시리즈에서는 Fig. 12(a)~(c)에 나타난 바와 같이 반복재하 하에서 단조하중 재하시에 비해 최대하중 및 처짐량이 저하되는 것으로 나타났다. 또한 동결융해 사이클진행에 따라 최대강도시 정·부방향, 처짐 평균값은 BDF13 실험체에서 2.87 mm, BDF13-150 및 BDF13-300 실험체에서 각각 3.36 mm, 4.10 mm로 증가되는 경향을 보였다. 반면, 현행 기준에서 허용하는 최대 인장철근비 ( $0.75\rho_b$ )로 보강된 BDF75 시리즈는 Fig. 12(d)~(f)에 나타난 바와 같이 반복하중 하에서도 단조하중 재하시에 비해 유사하거나 다소 높은 최대하중을 나타내었으며, 동결융해 사이클에 따른 하중 감소는 나타나지 않았다. 그러나 BDF13 시리즈와 마찬가지로 동결융해 사이클 진전에 따른 최대강도시 정·방향, 처짐 평균값은 BDF75 실험체에서 5.85 mm, BDF75-150 및 BDF75-300 실험체에서 각각 7.19 mm 및 7.10 mm로 증가되는 경향을 보였다.

이상과 같은 결과로부터, 낮은 철근비를 갖는 철근콘크리트 보가 동결융해 환경에 노출된 경우 최대강도는 저하되고 최대강도 변위가 증가되는 것으로 나타났다.

### 4.4 강성저하 특성

이 연구에서는 동결융해를 경험한 철근콘크리트 보의 반복재하시 강성저하 특성을 평가하고자 하였다. 이를 위해 다음 식 (1)과 같이 각 실험체의 강성을 무차원화함으로써 정량적으로 검토하였다.

$$\text{무차원화된 강성}(k) = \frac{k_n}{k_1} \quad (1)$$

여기서  $k_n$ 은 사이클별 강성특성,  $k_1$ 은 각 시리즈에서 인위적 균열손상 및 동결융해를 경험하지 않은 기준실험체의 초기강성이다.

최소 인장철근비( $0.13\rho_b$ )로 보강된 BF13 시리즈의 경우 Fig. 13(a)에 나타난 바와 같이 BDF75, BDF75-150

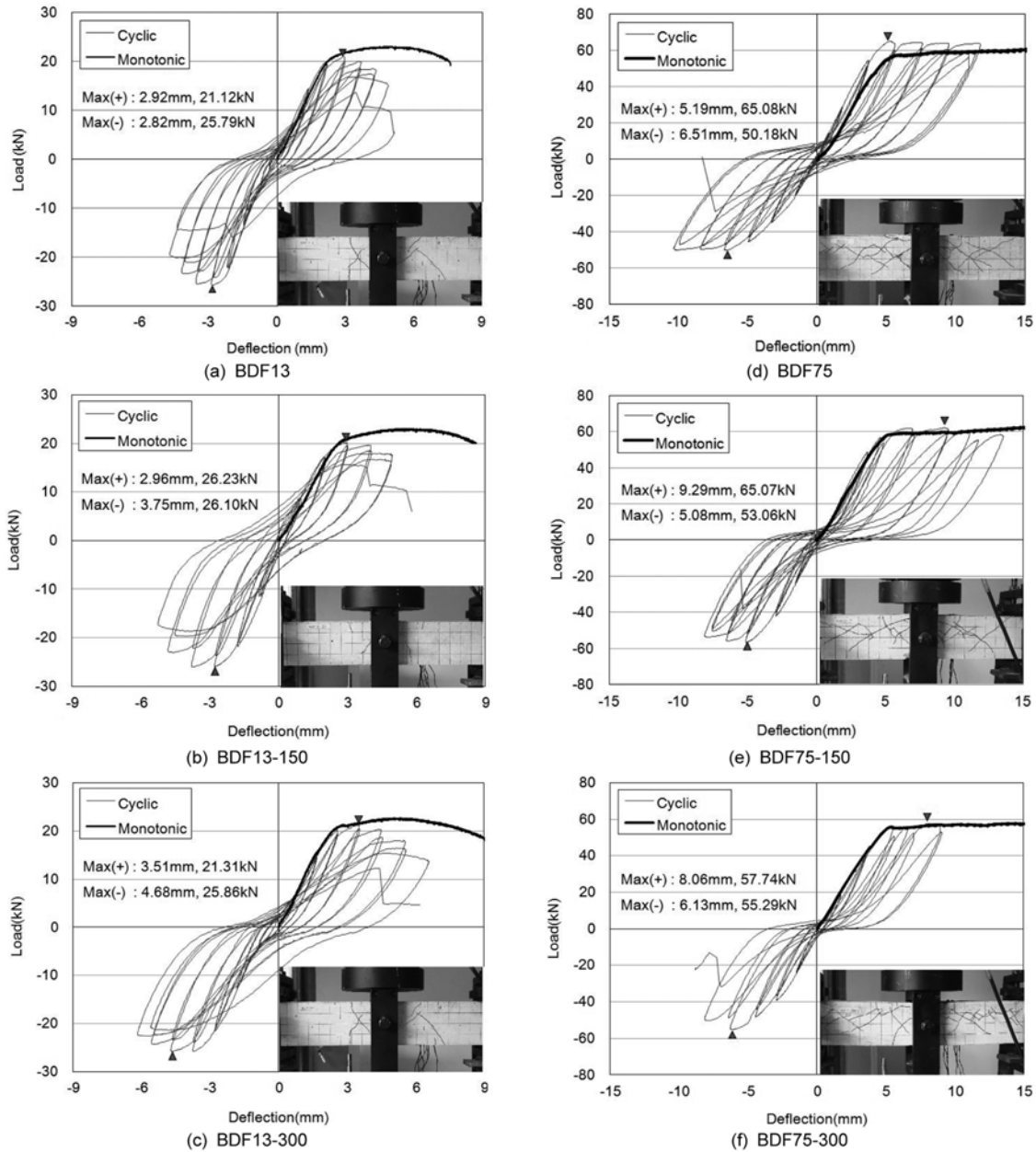


Fig. 12 Load-deflection curve at cyclic reversed loading

Table 5 Cyclic test results

Specimen	$P_y^*$ (kN)	$\delta_y$ (mm)	$k_y$ (kN/mm)	$P_u^*$ (kN)	$\delta_u$ (mm)	$k_u$ (kN/mm)	Relative $P_u^{**}$	Relative $P_u^{***}$	$M_n$ (kN·m)	$M_u / M_n$	Dissipated energy (kN·m)
BF13	19.62	1.65	11.86	24.72	3.05	8.12	1.00	0.90	6.10	1.01	783
BDF13	13.03	1.36	9.61	23.46	2.87	8.17	1.01	1.02	6.10	0.96	659
BDF13-150	16.11	1.44	11.16	26.17	3.36	7.80	0.96	1.14	6.06	1.08	623
BDF13-300	18.92	2.33	8.12	23.59	4.10	5.76	0.71	1.04	6.10	0.97	793
BF41	34.22	2.62	13.07	47.04	4.70	10.01	1.00	0.98	9.59	1.23	1565
BDF41	41.28	3.44	11.99	47.27	5.30	8.92	0.89	1.04	9.59	1.23	1666
BF55	30.92	2.30	13.45	41.95	5.69	7.37	1.00	0.82	11.27	0.93	2053
BDF55	32.57	2.49	13.10	43.00	6.95	6.19	0.84	1.03	11.27	0.95	2173
BF75	43.33	4.21	10.28	57.42	8.39	6.85	1.00	0.86	13.80	1.04	2471
BDF75	48.01	4.01	11.99	57.63	5.85	9.85	1.44	0.85	13.80	1.04	2419
BDF75-150	45.15	3.36	13.43	59.07	7.19	8.22	1.20	0.88	13.74	1.07	1877
BDF75-300	45.57	4.10	11.13	56.52	7.10	7.97	1.16	0.89	13.72	1.03	1081

\*  $P_u$ : Average value in positive and negative direction

\*\* Relative  $P_n$ : Flexural strength ratio (specimen exposed to FT cycles / specimen which is not exposed to FT cycles)

\*\*\* Relative  $P_{mn}$ : Flexural strength ratio (specimen under cyclic loading / specimen under monotonic loading)

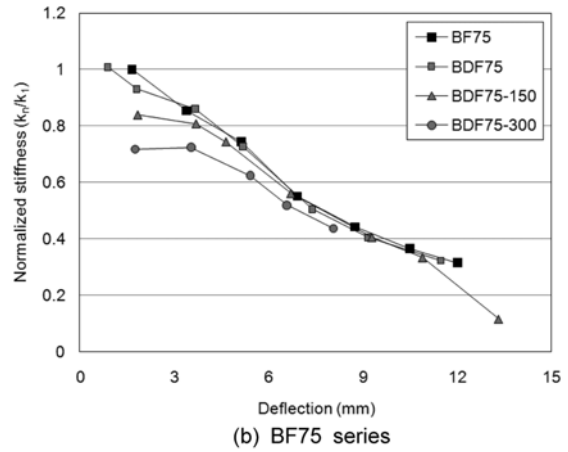
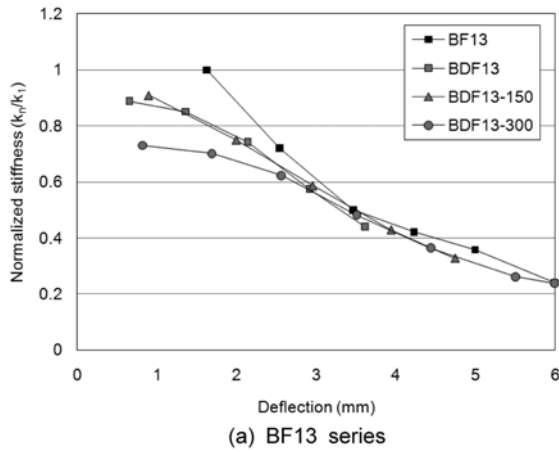


Fig. 13 Stiffness degradation based on increasing cycle

및 BDF75-300 실험체에서 각각 11.2%, 9.1% 및 27%의 강성저하를 보였다. 그러나 이와 같은 강성차이는 처짐이 증가되면서 감소되었으며, 처짐량 3 mm를 초과하면서 거의 유사한 특성을 나타내었다. 따라서 도입된 인위적 균열 손상 및 동결융해에 의해 저하되는 내력 및 강성특성은 3 mm 이후, 즉 모든 실험체의 최대하중 이후 구간에 끼치는 영향이 없는 것으로 판단되었다.

반면, 최대 인장철근비(0.75 $\rho_b$ )로 보강된 BF75 시리즈 실험체에서는 Fig. 13(b)에 나타난 바와 같이 초기강성에서는 BF75 실험체에 비해 BDF75, BDF75-150 및 BDF75-300 실험체에서 각각 6.9%, 16.1% 및 28.2% 저하되는 것으로 나타났다. 이후 처짐 6 mm, 즉 모든 실험체의 최대하중 시점을 지나면서 강성저하 차이를 보이지 않았으나, 동결융해 300 사이클을 경험한 BDF75-300 실험체에서는 최종 파괴시까지의 강성저하 특성이 다른 실험체와 상이하게 나타났다. 이는 동결융해시 콘크리트 내 모세관수의 동결팽창으로 인해 내부 파손이 발생함으로써 반복재하시 균열의 열림과 닫힘에 따른 균열면에서의 맞물림 저항에 기인한 것으로 사료된다. 특히, 이와 같은 균열면에서의 맞물림 저항은 이 연구에서 사용한 BF75 시리즈에서와 같이 인장 및 압축철근비가 상대적으로 큰 경우, 압축측 콘크리트의 휨거동 기여분이 동결융해에 의

해 감소될 경우 더욱 명확히 나타나는 것으로 판단되었다.

#### 4.5 에너지소산특성

Fig. 14는 BF13 및 BF75 시리즈의 누적에너지소산지표(energy dissipation index)를 비교하여 나타난 것이다. 누적에너지소산능력은 Fig. 12의 반복재하에 따른 이력곡선(hysteresis loop)으로 둘러싸인 면적으로 산정되므로, 하중 또는 변위가 클수록 증가하는 경향이 있다. 따라서 이 연구에서는 동결융해에 의해 저하되는 강도 특성을 제외하면서 반복재하를 받는 휨거동에 의한 에너지소산능력을 평가하고자 하였다. 식 (2)와 같이 누적에너지소산능력( $E$ )을 최대하중( $P_{max}$ ) 및 변위( $\delta_{max}$ )로 나눔으로써 강도 및 변형특성 기여분을 무차원화하였다.

$$\text{누적에너지소산지표} = \frac{E}{P_{max} \times \delta_{max}} \quad (2)$$

BF13 시리즈에서는 Fig. 14(a)에 나타난 바와 같이 손상 및 동결융해를 경험한 실험체의 에너지소산능력이 BF13에 비해 다소 저하되는 경향을 보였으나 큰 차이를 나타내지 않았다. 그러나 동결융해 300사이클을 경험한 BDF13-300 실험체는 다른 실험체에 비해 약 50% 저감

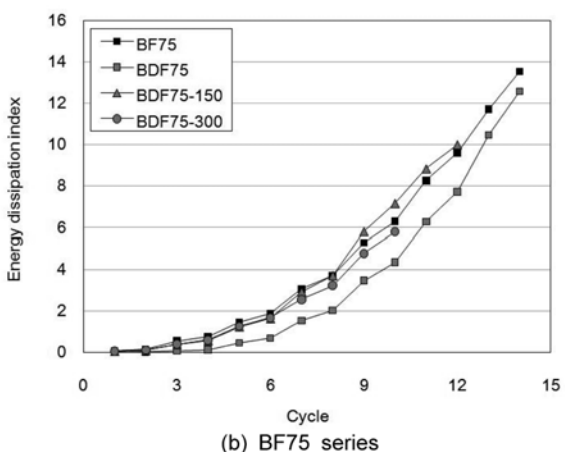
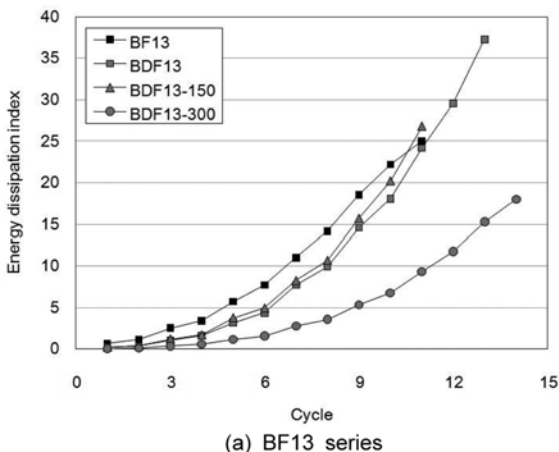


Fig. 14 Energy dissipation capacity



되는 에너지소산특성을 나타내었다.

한편, Fig. 14(b)에 나타난 바와 같이 BF75 시리즈에서는 인장철근비 증가로 인해 보의 최대하중 및 최대하중 시 처짐량이 다소 증대됨에 따라 누적에너지소산지표가 BF13 시리즈에 비해 상대적으로 감소하였다. 그러나 그림에 나타난 바와 같이 에너지소산특성은 유사한 것으로 나타나 이 연구 범위에서 인위적 균열손상 및 동결융해에 의한 영향은 최대철근비일 경우 미미한 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

- 1) 콘크리트 압축강도 및 동탄성계수는 동결융해 사이클 진전에 비례하여 각각 6.1% 및 14.2%까지 저하되는 특성을 보였으나, 콘크리트 내구성을 확보하기 위하여 KS F 2456에서 규정하고 있는 최저 상대동탄성계수인 60%이상보다 높게 나타나 내동해성에 재료적 문제는 없는 것으로 나타났다.
- 2) 단조 및 반복재하시 균열 및 파괴양상은 동결융해 사이클에 따라 다소 차이를 보였으나 특이할 만한 점은 발견되지 않았다. 그러나 단조재하시 동결융해 사이클이 진전됨에 따라 강도, 연성, 강성이 감소하는 특성을 보였으며, 특히 균열손상을 경험한 BDF13 시리즈는 현행 콘크리트설계기준에서 요구하는 공칭모멘트를 만족하지 못하는 것으로 나타났다.
- 3) 최대하중 이전에서는 인위적 균열손상 및 동결융해에 의해 강성이 감소되어 강성차이가 크게 나타났으나, 최대하중 이후에는 강성차이가 감소하는 등 휨 부재의 연성능력에 대한 영향은 적은 것으로 판단된다. 그러나 최대철근비를 갖는 경우, 동결융해 300사이클을 경험한 실험체의 강성이 지속적으로 감소추세를 보였다. 따라서 반복하중을 경험하게 되는 부재의 설계시, 내력 증가에 필요한 철근비 고려뿐만 아니라 동결융해로 인한 압축축 콘크리트의 변형 및 이에 따른 처짐특성도 고려되어야 할 것으로 판단된다.
- 4) 에너지소산지표를 비교한 결과, 최소철근비인 경우 동결융해 300사이클을 경험한 실험체에서 낮은 에

너지소산특성을 보였으나, 최대철근비인 경우 동결융해에 의한 에너지소산특성 차이가 크지 않은 것으로 나타났다. 따라서 인장철근비가 상대적으로 작은 경우, 동결융해 경험 후 지진과 같은 반복하중 발생시 에너지를 소산할 수 있는 능력이 상대적으로 감소될 것으로 판단된다.

- 5) 이 연구 범위 내에서 동결융해를 300사이클 경험한 콘크리트의 동탄성계수는 내동해성에 문제가 없는 것으로 나타났으나, 휨성능의 저하를 확인할 수 있었다. 따라서 추후 구조물의 휨성능에 대한 동결융해 영향 평가 및 특성 규명시 전단경간비, 직사각형 단면형상 등에 대한 고려가 필요하며, 실규모의 검증실험을 통한 정량적 평가가 요구될 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. Nevil, A. M., *Properties of Concrete*, Fourth Edition, Longman, 1995, 287 pp.
2. 기상청, 2008, <http://www.kma.go.kr>.
3. 고경택, 김도겸, 김성욱, 조명석, 송영철, “동결융해와 염해의 복합작용을 받는 콘크리트의 내구성능 저하평가,” 콘크리트학회 논문집, 13권, 4호, 2001, pp. 397~405.
4. 고경택, “동결융해에 대한 설계 및 대책방안,” 콘크리트학회지, 13권, 6호, 2001, pp. 44~51.
5. 노재준, 소양섭, 박홍신, 유영호, “동결융해작용을 받은 콘크리트의 파괴거동에 관한 연구,” 대한건축학회 학회지, 28권, 12호, 1984, pp. 57~64.
6. 山下英俊, “凍結融解を受けるコンクリートの劣化豫測に關する研究,” 콘크리트工学年次論文報告集, Vol. 14, No. 1, 1992, pp. 1021~1026.
7. 成田建., “凍害劣化確率モデル構成要素に及ぼす影響要因の考察,” 日本建築學會構造系論文集, No. 455, 1994, pp. 1~6.
8. Ghaffori, N. and Mathis, R., “Prediction of Freezing and Thawing Durability of Concrete Paving Blocks,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 10, No. 1, 1998, pp. 45~51.
9. 한국콘크리트학회, “콘크리트구조설계기준,” 기문당, 2007, 523 pp.
10. 지식경제부 기술표준원, “급속동결 융해에 대한 콘크리트의 저항 시험방법, KS F 2456,” 지식경제부 기술표준원, 2008, 14 pp.

**요 약** 이 연구에서는 동결융해 사이클을 경험한 2가지 종류의 휨부재의 거동특성을 평가하였다. 이 연구의 목적은 동결융해에 따른 철근콘크리트 보의 거동특성을 검토하는 것이다. 이를 위해 일부 실험체는 동결융해를 경험하기 전, 인장철근이 항복되기까지 손상을 입도록 계획되었다. 또한 반복하중 재하시 강성저하 특성을 평가하기 위하여 단조 및 반복재하 실험을 실시하였다. 재료 실험 결과, 동결융해 300사이클을 경험한 콘크리트의 상대동탄성계수는 86.8%까지 감소되었으나 내동해저항성은 충분히 가지고 있는 것으로 평가되었다. 단조재하 실험 결과, 동결융해 사이클에 따른 휨강도, 연성 및 강성은 상대적으로 감소하는 것으로 나타났다. 특히, 인위적 균열손상을 경험한 BDF13 시리즈는 현행 콘크리트설계기준에서 요구하는 공칭모멘트를 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 반복재하시 BF75 시리즈에서 동결융해를 경험함에 따라 10% 이상의 반복강성 저하를 나타내었다. 따라서 내진부재와 같이 반복하중을 받게 되는 부재를 설계할 경우, 동결융해로 인한 압축축 콘크리트의 변형 특성도 고려되어야 할 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 철근콘크리트 보, 휨거동, 동결융해 사이클, 균열손상, 인장철근