

## 자기충전 콘크리트의 워커빌리티 시험 방법 및 성능 기준

Test Method and Performance Specification for Workability of Self-Compacting Concrete



이회근\*  
Hoi-Keun Lee



이승훈\*\*  
Seung-Hoon Lee



카말 카야트\*\*\*  
Kamal H. Khayat

### 1. 머리말

콘크리트 타설시 요구되는 워커빌리티(workability)는 공사의 형태, 타설 및 다짐 방법, 거푸집의 복잡한 정도, 철근 배근의 밀집 유무에 영향을 미치는 구조 설계 상세 등에 따라 달라진다. 콘크리트 부재의 구조적 성능을 증가시키기 위해 철근의 과밀 배근이 증가하면서 거푸집 내의 콘크리트 채움 정도를 확보하기 위해 유동성이 높은 콘크리트의 사용이 증가하고 있다. 하지만, 이러한 콘크리트의 특성상 과도한 다짐은 재료 분리, 블리딩, 그리고 철근 사이의 좁은 공간을 지날 때 콘크리트의 막힘이 발생할 수 있다<sup>1)</sup>. 또한 타설된 콘크리트의 균질성과 충분한 다짐을 확보하기 위해서는 숙련공과 엄격한 품질 관리가 요구된다. 1986년 일본 Kochi 대학의 Hajime Okamura 교수에 의해 개념이 소개된 자기충전 콘크리트(self-compacting concrete, SCC)는 별도의 다짐 작업 없이 거푸집의 모든 부분에 충전될 수 있는 콘크리트로, 높은 유동성에도 불구하고 재료 분리 저항성이 우수하기 때문에 과밀 배근된 매우 복잡한 구조 부재라도 거푸집의 구석까지 쉽게 채워질 수 있는 고성능 콘크리트이다. 1980년대 말 이후로 일본을 비롯한 북미, 유럽 등 세계 각국에서 프리캐스트/프리스트레스트 부재와 같은 과밀 배근된 콘크리트 부재 제작 및 다짐이 여의치 않은 부분에서의 타설 시 SCC를 사용하고 있으며, 그 사용량은 점점 증가하고 있다. 국내에서도 철근 및 기타 간섭 시설이 많아서 다짐작업이 곤란한 경우, 다른 구조물의 간섭 및 구조용 부재 특성상 내부 진동기의 사용이 어려운 경우, 대규모 타설 시 타설 시간 및 타설 인력 증가, 품질 확보 등이 어려운 경우에 제한적인 범위 내에서 SCC가 사용되고 있다.

본고에서는 SCC의 워커빌리티 특성과 이를 평가할 수 있는 각종 시험방법들을 소개함과 아울러, 각국의 워커빌리티 성능에 대한 기준을 알아봄으로써 SCC에 대한 이해와 활용성을 높이고자 한다.

### 2. SCC의 워커빌리티 특성

일반적으로 콘크리트의 워커빌리티라 함은 콘크리트의 배합, 타설, 다짐, 마무리 등 일련의 작업을 용이하게 하는 작업성을 의미하지만, SCC의 경우에는 그 이외에도 콘크리트 타설 시 흐름성과 충전성을 포함한다. <그림 1>에 나타난 바와 같이, SCC의 워커빌리티는 충전성(filling ability), 간극 통과성(passing ability), 안정성(stability)에 의해 설명된다.

충전성이란 콘크리트의 변형이 자유로워 다짐 없이 철근 주위를 완전히 감싸며 자신만의 무게로 거푸집을 채울 수 있는 능력을 말하며, 이는 콘크리트 타설 방법 및 타설 거리 등에 있어서 중요한 성질이다.

간극 통과성이란 다짐이 없는 상태에서 골재의 블럭 현상이 발생하지 않으면서 거푸집 내의 좁은 공간을 통과할 수 있는 능력을 나타내며, 콘크리트의 블럭현상은 단면의 축소 또는 철

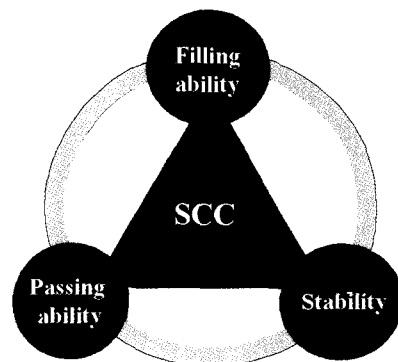


그림 1. SCC의 워커빌리티 특성

\* 정회원, 삼성물산(주) 건설부문 기술연구소 선임연구원  
hoikeun.lee@samsung.com

\*\* 정회원, 삼성물산(주) 건설부문 기술연구소 수석연구원

\*\*\* Univ. Sherbrooke 토목공학과 교수

표 1. SCC의 워커빌리티 시험방법

성질	시험방법
충전성	· Slump flow · T50
간극 통과성	· JRing · V-funnel · L-box · U-box · Orimet · Caisson filling vessel
안정성	· GTM screen test · Surface settlement · Column segregation · Visual stability index · V-funnel at 5 min · L-box at 5 min · Pressure bleeding

근 주의에서의 국부적인 재료 분리에 의해 발생할 수 있다.

안정성은 재료 분리에 대한 저항성으로 콘크리트 운반 및 타설 전후로 콘크리트가 균질한 상태를 유지할 수 있는 능력을 나타낸다. 안정성에는 크게 콘크리트의 운반, 치기, 거푸집 내 흐름 시에 구성 성분들의 분리에 대한 저항성을 나타내는 동적 안정성(dynamic stability)과 콘크리트 타설 후 재료 분리와 블리딩에 대한 저항성을 나타내는 정적 안정성(static stability)으로 나뉜다.

이밖에도 레올로지 관점에서 SCC는 높은 변형성을 확보하기 위해 낮은 항복 응력과 입자들의 균질한 분포를 유지하기 위한 보통의 점성을 가짐으로써 입자들 간의 충돌, 분리, 블럭 현상을 감소시킨다. 여기서 항복 응력(yield stress)이라 함은 콘크리트가 흐르기 시작하기 위해 요구되는 최소한의 전단 응력(shear stress)을 의미하며, 이러한 항복 응력 이전에서의 콘크리트에는 어떠한 변형도 발생하지 않으며 고체 입자와 같이 거동한다. 일단 콘크리트가 흐르기 시작하면 전단 응력과 전단 속도(stress rate) 사이에 일정한 비례관계가 있는 데 이를 점성(plastic viscosity)이라 한다. 점성의 감소는 구성 성분들의 균질한 분포를 유지할 수 있는 콘크리트 배합의 능력을 감소시키며, 점성의 정도는 콘크리트의 안정성, 마감, 현장 콘크리트의 성질들에 큰 영향을 미친다.

### 3. SCC의 워커빌리티 시험 방법

〈표 1〉에 나타난 바와 같이, 지금까지 SCC의 주요한 워커빌리티 특성을 평가하기 위한 다양한 시험 방법들이 사용되어 왔다. 본장에서는 대표적인 워커빌리티 시험 방법들을 간단히 소개하고자 한다.

#### 3.1 충전성

가장 널리 손쉽게 평가할 수 있는 슬럼프 플로우 시험은 일반 콘크리트의 슬럼프 실험과 동일하나, 슬럼프 콘에 콘크리트를 채운 후 다짐을 하지 않은 상태에서 슬럼프 콘을 들어 올린 직후부터 콘크리트가 흐르기 시작하여 콘크리트의 흐름이 완전히 멈춘 후 최대 지름과 이와 수직인 방향의 지름을 각각 측정하여 이의 평균을 슬럼프 플로우로 결정한다. 아울러, 슬럼프 콘을 들어 올린 직후부터 콘크리트가 흐르기 시작하여 500 mm의 플로우에 도달하는 시간을 측정함으로써 SCC의 점성을 평가할 수 있으며, 이를 T50이라 한다. 슬럼프 플로우가 증가할수록 콘크리트의 자유 변형성이 큼을 의미하며, 일반적으로 통용되는 기준은 없으나 2방향으로 측정된 콘크리트 지름의 차이가 50 mm 이내가 되면 적당하다.

#### 3.2 간극 통과성

##### 3.2.1 JRing 플로우

JRing 시험은 밀집해 있는 장애물 사이를 통과하는 콘크리트의 변형성을 평가하는 데에 사용된다. Ring안에 슬럼프 콘을 놓고 슬럼프 플로우 실험과 동일한 방법으로 수행한다. 〈그림 2〉에서 보듯이, 콘크리트의 흐름이 멈춘 후 2방향으로 지름을 측정하며, 모두 4곳에서 JRing 내/외부의 콘크리트 높이를 측정 후 이들의 차이를 각각 계산하여 평균한다.

독일의 SCC 가이드라인에서는 슬럼프 플로우와 JRing 플로우와의 차이가 50 mm 이하를 권장한다<sup>2)</sup>. 또한, JRing의 철근 사이의 간격은 굵은골재 최대 치수( $G_{max}$ )에 따라 다르며, 사용하고

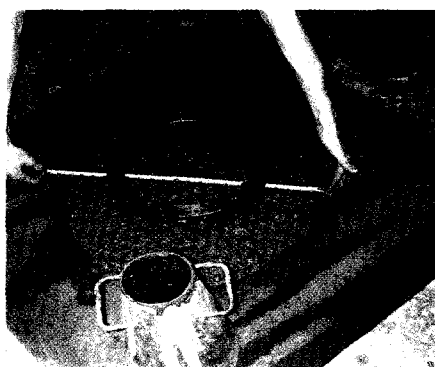


그림 2. JRing 시험



그림 3. JRing과 Orimet 시험

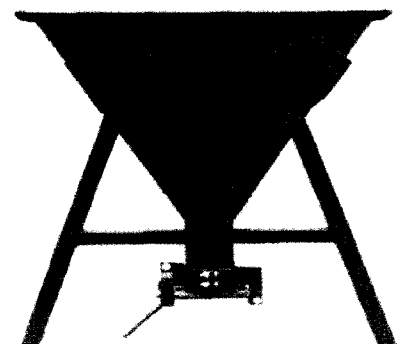


그림 4. V-funnel 플로우 시험

자 하는  $G_{max}$ 의 2.5 ~ 3.0배 정도가 일반적으로 적당하다<sup>2,3)</sup>. 또한, 이밖에도 JRing 시험은 슬럼프 플로우 또는 <그림 3>에서와 같이 Orimet 시험과 함께 사용되기도 한다.

### 3.2.2 V-funnel

SCC의 흐름 경로 변화에 대한 유연성과 골재의 막힘없이 제한된 지역을 통과할 수 있는 능력은 <그림 4>와 같은 V-funnel 플로우 시험을 통해 평가할 수 있다.

V-funnel에 콘크리트를 다짐 없이 채운 후 약 1분 정도 지난 후에 게이트를 개방함과 동시에 콘크리트가 빠져 나가는 시간 측정을 시작하여 funnel의 아랫부분에서 빛이 보이기 시작할 때까지의 시간을 측정한다. 플로우 시간이 길다는 것은 시멘트 풀의 점성이 크고 골재 상호간의 마찰이 커서 결국 변형성이 낮거나 골재의 막힘이 발생함을 의미한다.

### 3.2.3 L-box와 U-box

박스 형태의 두 시험은 SCC의 정적 그리고 동적인 재료 분리에 대한 저항성뿐만 아니라 철근 사이를 통과하는 능력을 평가한다. <그림 5>에 나타낸 바와 같이, L형 박스에 콘크리트를 채운 후 약 1분 정도 기다린 후 게이트를 개방함과 동시에 시간 측정을 시작하여 콘크리트가 끝단에 최초 도달한 시간을 기록하며 콘크리트의 흐름이 완전히 종료된 후  $H_1$ 과  $H_2$ (<그림 5 참조>)를 측정하여  $h_2/h_1$ 을 결정하며, 이를 블로킹비율(blocking ratio)이라 한다. 블로킹비율이 1.0에 가까울수록 SCC의 흐름성 및 간극 통과성이 우수함을 의미하며, 부재 내 철근 배근의 정도가 보통일 경우, 철근 사이의 간격은  $G_{max}$ 의 3배 정도가 적당하다. U형 박스 시험은 <그림 6>과 같이 U자형 박스에 콘크리트를 채우고 약 1분 정도 후에 게이트를 열어 SCC가 자유롭게 다른 쪽으로 흐를 수 있도록 한다. SCC의 흐름이 완전히 멈춘 후에 R1과 R2의 높이를 각각 측정하고 R1-R2를 계산한다. 양쪽에서 측정한 콘크리트의 높이 차이가 0에 가까울수록 SCC의 흐름성 및 간극 통과성이 우수함을 의미한다. 한편, 대상 구조물의 철근 모양, 크기, 배근 정도에 따라 5-D10과 3-D13 철근(bar)을 선택하여 사용하며,  $G_{max}$ 가 25 mm 이상인 경우에는 적당하지 않다.

### 3.2.4 Filling capacity

Kajima 시험이라고도 불리는 filling capacity 시험은  $G_{max}$ 가 20 mm 이하인 SCC의 흐름성과 간극 통과성을 동시에 평가할 수 있다. <그림 7>에서 보듯이, 35개의 철근(bar)이 존재하는 박스에 일정한 속도로 높이가 220 mm가 될 때까지 콘크리트를 채우고 콘크리트의 흐름이 완전히 멈춘 후에 콘크리

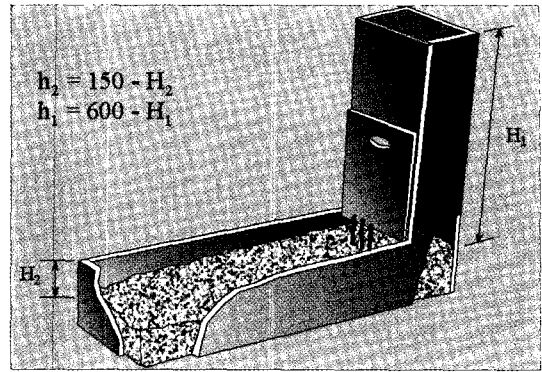


그림 5. L형 박스 시험

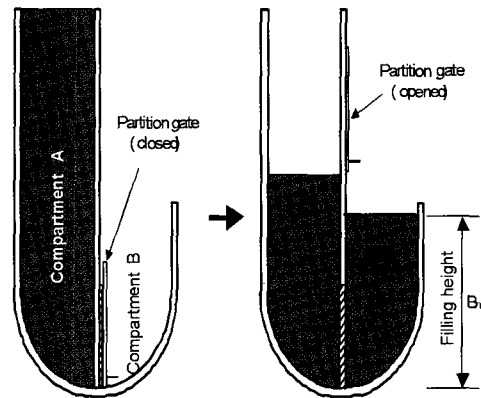


그림 6. U형 박스 시험

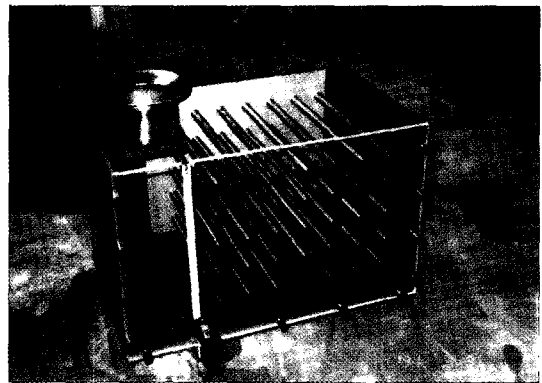


그림 7. Filling capacity 시험

트에 의해 채워진 부분과 채워지지 않은 부분의 면적을 이용하여 filling capacity(%)를 구한다. 비록 이 시험은 다소 복잡한 시험 기기와 시험 시 많은 양의 콘크리트가 소요되기 때문에 현장에서의 사용이 쉽지 않으나, SCC의 자기충전(self-leveling) 및 흐름 특성을 시각적으로 평가할 수 있다.

## 3.3 안정성

### 3.3.1 육안 식별에 의한 안정성 평가

표 2. 육안 식별 지수<sup>4)</sup>

등급	콘크리트 상태
0	재료 분리 없음
1	재료 분리 없으나 약간의 블리딩 또는 공기 방울이 표면에 떠오름
2	약간의 재료 분리가 발생하고 과도한 블리딩 발생
3	확실한 재료 분리

슬럼프 플로우 시험 후 콘크리트의 상태를 육안으로 관찰하여 <표 2>에 나타낸 바와 같이 콘크리트의 상태를 크게 4개의 등급으로 구분함으로써 SCC의 재료 분리 및 안정성을 평가한다.

### 3.3.2 표면 침하량 시험

SCC의 소성 상태에서부터 경화 시간까지의 안정성을 간단하게 평가할 수 있는 표면 침하량 시험은 콘크리트 배합 조성이 안정성에 미치는 영향을 정량화할 수 있다. <그림 8>과 같이 튜브의 일정 높이까지 콘크리트를 채운 후 상부 표면에 LVDT 또는 다이얼 게이지를 수직으로 위치시켜 침하량이 일정해질 때까지 침하량을 모니터링 한다. 고유동 콘크리트 또는 SCC를 대상으로 한 표면 침하량 시험 결과로부터 표면 침하량은 골재의 재료 분리와 밀접한 관련이 있음이 보고되었다<sup>4)</sup>.

### 3.3.3 재료 분리 시험

<그림 9>와 같이 4부분으로 이루어진 튜브에 콘크리트를 채운 후 다짐봉으로 5회 다진 후 15분간 기다린 다음 색선별로

표 3. SCC의 워커빌리티 성능 기준

시험 방법	기준
슬럼프 플로우	1. 650~800 mm 2. 600~700 mm 3. ≥ 660 mm 4. 650~750 mm 5. 없음
T50 도달시간	1. 2~5sec 2. 3~5sec 3. 3~7 sec
JRing 플로우	1. 0~10 mm 2. <15 mm 3. <15 mm
V-funnel	1. 6~12 sec 2. 6~10 sec 3. 6~10 sec
L-box	1. h2/h1>0.80 2. h2/h1>0.75 3. h2/h1>0.75
U-box	1. R1-R2=0~30 mm 2. Rank 1 또는 Rank 2 3. Rank 1
Filling vessel	1. ≥ 90 %
표면침하	6. ≤ 0.5 % 7. 재료 분리 지수(I <sub>seg</sub> )
재료분리	I <sub>seg</sub> ≥ 0.96 : No segregation 0.88 ≤ I <sub>seg</sub> ≤ 0.95 : Mild segregation 0.72 ≤ I <sub>seg</sub> ≤ 0.87 : Notable segregation I <sub>seg</sub> ≤ 0.71 : Severe segregation
VSI	3. 0 또는 1등급

1. EFNARC, Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete<sup>6)</sup>
2. JSCE, Recommendations for Self-Compacting Concrete<sup>7)</sup>
3. PCI Interim Guidelines<sup>3)</sup>
4. Swedish Concrete Association, Self-Compacting Concrete, Recommendations for Use<sup>9)</sup>
5. RILEM TC 174, Self-Compacting Concrete<sup>5)</sup>
6. Université de Sherbrooke<sup>10)</sup>
7. Rooney, M.<sup>11)</sup>



그림 8. 표면침하량 시험

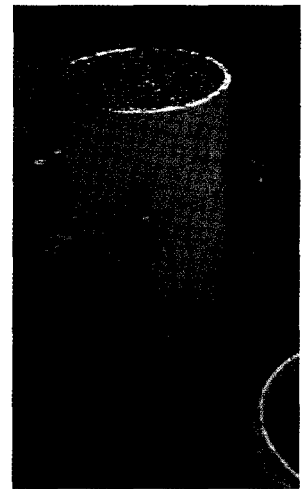


그림 9. 재료분리시험

각각 나누어 담고 각 버킷에 담겨 있는 콘크리트의 무게를 측정한다. 5 mm 체를 이용하여 굵은 골재만을 선별, 씻은 후에 표면 건조 포화 상태에서의 골재의 무게를 색선별로 측정하고 높이에 따른 골재 분포의 변동 계수(C.O.V.)를 계산한다. 재료 분리의 저항 정도는 상/하부의 골재량의 비로 표현되며, 이를 재료 분리 지수(I<sub>seg</sub>)라 한다.

## 4. SCC의 워커빌리티 성능 기준

이상에서 언급한 바와 같이, SCC의 워커빌리티 특성을 평가하기 위해 다양한 시험 방법들이 사용되고 있으며, ASTM Committee C09(Concrete and Concrete Aggregates)의 Subcommittee C09.47(Self-consolidating concrete)에서 SCC 시험에 대한 표준화가 진행 중에 있다<sup>5)</sup>. <표 3>은 PCI<sup>3)</sup>, EFNARC<sup>6)</sup>, JSCE<sup>7)</sup>, RILEM<sup>8)</sup>, Swedish concrete association<sup>9)</sup> 등에서 제안하고 있는 각 시험 항목별 성능 기준을 나타낸다. 하지만, 이러한 값들은 일반적인 것으로 적용하고자 하는 대상 구조물의 특성을 고려하여 수정될 수 있다. 이러한 성능을 만족하는 SCC를 얻기 위해서는 충전성, 간극 통과성, 안정성 측면에서 균형 잡힌 콘크리트 배합 설계를 하는 것이 중요하다. 또한, <표 4>에 나타낸 바와 같이 적용 대상 구조물 부재의 특성을 고려하여 SCC의 워커빌리티 특성을 선택해야 한다. 예를 들면, 부재 모양이 매우 복잡하고 철근이 과밀 배근된 경우 슬럼프

표 4. 부재 특성에 따른 SCC의 워커빌리티 적정 수준<sup>3)</sup>

구분		슬럼프 플로우(mm)			T50(sec)			L-box(h <sub>2</sub> /h <sub>1</sub> )(%)			JRing(mm)			V-funnel(sec)		
		560 이하	560~660	660 이상	3이하	3~5	5이상	75이하	75~90	90이상	15이하	10~15	10 이상	6이하	6~10	10이상
철근 배근 정도	Low															
	Medium	■			■			■				■	■	■	■	■
	High	■			■			■			■	■	■	■	■	■
부재 모양의 복잡성	Low															
	Medium	■					■									■
	High	■	■				■				■	■	■			■
부재 깊이	Low															
	High				■						■	■	■	■	■	■
콘크리트 표면의 중요도	Low															
	Medium	■					■									■
	High	■	■				■									■
부재 길이	Low															
	Medium	■					■	■	■		■	■	■			
	High	■	■		■			■	■	■	■	■	■	■	■	
벽 두께	Low	■	■				■	■	■							■
	High	■	■				■	■	■							■
얇은 플레량	Low															
	Medium										■	■	■			■
	High										■	■	■			■

■ : Potential problem area

플로우는 660 mm 이상, T50는 3 ~ 5초, L형 박스 (h<sub>2</sub>/h<sub>1</sub>)는 75 % 이상, JRing은 15 mm 이하, V-funnel 플로우 시간은 6 ~ 10 sec가 되도록 한다.

### 5. 맺음말

지금까지 SCC의 워커빌리티 특성 및 각종 시험 방법을 비롯한 성능 기준들에 대해 살펴보았다. 국외와 달리 국내에서는 SCC가 국내에서는 제한적으로 사용되고 있는 실정이지만 SCC의 워커빌리티에 대한 이해와 이를 적절히 평가할 수 있는 시험 방법의 표준화 및 국내 실정에 맞는 워커빌리티 성능 기준이 정립된다면 SCC가 보다 활발하게 적용될 것으로 사료되며, 본고 가 SCC의 이해를 돕는 자료로 활용될 수 있기를 바란다. □

### 참고문헌

1. Khayat, K.H., "Workability, Testing, and Performance of Self-Consolidating Concrete", *ACI Materials Journal*, Vol.96, No. 3, 1999, pp.346~353.
2. Brameshuber, W. and Uebaches, S., "Practical Experience with the Application of Self-Compacting Concrete in Germany", *Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete*, Tokyo, Japan, 2001, pp.687~696.
3. Precast/Prestressed Concrete Institute, *Interim Guidelines for the Use of Self-Consolidating Concrete in Precast/ Prestressed Concrete Institute Member Plants*, PCI, 2003, 148pp.
4. Khayat, K. H. and Guizani, Z., "Use of Viscosity- Modifying Admixtures to Enhance Stability of Fluid Concrete", *ACI Materials Journal*, Vol.94, No.4, 1997, pp.332~340.
5. Vachon, M., *ASTM Puts Self-Consolidating Concrete to the Test*, ASTM Standardization, July, 2002, pp.34~37.
6. European Federation of National Trade Associations(EF-NARC), *Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*, UK, 2002, 32pp.
7. Japan Society of Civil Engineers, *Recommendations for Self-Compacting Concrete*, Tokyo, 1999, 77pp.
8. State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 174-SCC, *Self-Compacting Concrete*, Report 23, Ed. A. Skarendahl, O. Petersson, 2000, 154pp.
9. Swedish Concrete Association, *Self-Compacting Concrete, Recommendations for Use*, Concrete report No.10(E), 2002, 84pp.
10. Hwang, S. D., Khayat, K.H., and Bonneau, O., "Performance-Based Specifications of Self-Consolidating Concrete Used for Repair Applications", *ACI Materials Journal*, Vol.103, No.2, 2006, pp.121~129.
11. Rooney, M., *Assessment of the Properties of Fresh Self-Compacting Concrete with Reference to Aggregate Segregation*, PhD Thesis, University of Paisley, Paisely, Scotland, 2002, 347pp.