

전기로 산화슬래그 골재를 사용한 철근콘크리트 부재의 구조 성능 검토

Evaluation of Structural Performance of Reinforced Concrete Members with Electric Arc Furnace Oxidizing Slag Aggregate



김상우*
Sang Woo Kim



이용준**
Young Jun Lee



정유진***
You Jin Jung



류득현****
Deug Hyun Ryu



김길희*****
Kil Hee Kim

1. 서론

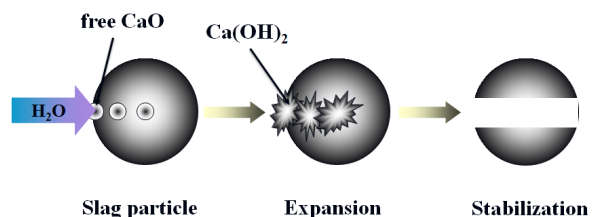
국내의 조강 생산 능력은 1960년대 이후 지속적인 경제 발전으로 거의 매년 꾸준히 증가하여 2007년에는 세계 6 위인 약 51.5백만 톤에 이르렀다.¹⁾ 철강 산업은 제조 공정의 특성상 원료, 제선, 제강, 압연 및 스테인레스 등 복잡한 공정을 거치면서 많은 에너지를 소비하고 다량의 부산물을 발생시키는데, 가장 많은 양을 차지하는 부산물이 슬래그이다.

철강 부산물인 슬래그는 고로에서 선철을 만드는 과정에서 발생하는 제강슬래그와 선철을 정련하여 불순물을 제거하는 과정에서 발생하는 제강슬래그로 구분할 수 있

다. 제강슬래그 중에서 전기로슬래그는 철 스크랩을 용해 정련하는 과정에서 발생되며, 환원정련에서 발생하는 환원 슬래그와 산화정련에서 발생하는 산화슬래그가 있다. 환원 슬래그는 유리석회(Free CaO)의 함유율이 매우 높아 콘크리트용 골재로서 사용할 수 없지만, 산화슬래그는 유리석회 등의 함유량이 환원슬래그에 비하여 높지 않아 유리석회를 산화물로 처리할 경우 콘크리트용 골재로 활용이 가능하다. 과거에는 전기로 내에서 두 정련과정이 함께 이루어져 산화 및 환원슬래그의 분리가 어려웠지만, 현대의 전기로 제강법에서는 산화환원 공정이 명확히 구분되어 산화슬래그만을 분리하는 것이 가능하게 되었다.

전기로 산화슬래그에 포함된 유리석회는 [그림 1]과 같이 수분과 반응하여 약 2배까지 팽창·붕괴하면서 보다 안정적인 산화물로 변하는 특성을 가지고 있다. 이러한 팽창 성질을 안정화시키기 위하여 현재 가장 많이 사용되는 기술은 에이징(aging) 처리이다. 에이징 처리 기술은 산화물로 바뀌는 일

- * 공주대학교 건축공학과 연구교수
Kongju National University
- ** 공주대학교 건축공학과 석사과정
Kongju National University
- *** 공주대학교 건축공학과 석사과정
Kongju National University
- **** 유진기업(주) 기술연구소장
Eugene cooperation R&D Center
- ***** 공주대학교 건축공학과 부교수
Kongju National University
E-mail : kimkh@kongju.ac.kr



[그림 1] 제강슬래그 골재의 팽창 붕괴 모식도

련의 과정이 종료될 때까지 옥외에 존치시키는 방법으로 반응이 비교적 느려 보통 6개월에서 1년 정도 기간이 소요된다. 이러한 공정은 오랜 시간과 넓은 야적장을 요구하는 등 골재의 반응 안정화 작업에 따른 경제적 비용이 매우 크다. 또한 충분한 에이징을 하더라도 국부적으로 미반응한 입자가 팽창붕괴를 야기할 수 있어 콘크리트용 골재로 재활용 하는데 제약을 받았다.

최근에는 용융된 제강슬래그를 장기 서냉에 의해 에이징 시키지 않고 팬에 의해 서냉 또는 급냉시켜 제강슬래그에있는 유리석회를 화합물 상태로 존치시킴으로써 유리석회의 생성량을 감소시키는 방법이 개발되었다. 이 방법을 이용할 경우 경제성이 확보되는 물론 구형의 입자를 얻을 수 있어 콘크리트용 골재로 활용하는데 적합하다. 이러한 이유로 최근 전기로 산화슬래그 골재에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나 대부분 재료의 기초물성에 관한 연구이며, 구조부재에 적용되었을 때의 역학적 특성과 성능 검증에 대한 연구는 미약한 실정이다.

본 논고에서는 전기로 산화슬래그 골재에 대한 관심을 높이고 구조부재 적용에 대한 기초자료를 제공하기 위하여 전기로 산화슬래그 골재를 사용한 철근콘크리트(RC) 보의 부착 성능과 휨 성능을 평가한 결과^{2,3)}를 소개하고자 한다.

2. 전기로 산화슬래그 골재를 사용한 RC 보의 부착 성능 평가

2.1 실험 계획

2.1.1 사용 재료

전기로 산화슬래그의 물리적 특성은 <표 1>에 나타내었으며, 모든 특성치는 기준^{4,5)}을 만족하고 있다. 실험에 사용된 콘크리트와 철근의 응력-변형률 관계는 [그림 2]에 나타내었다. 천연 잔 골재와 천연 굵은 골재는 국내에서

생산되는 세척사와 쇄석을 이용하였다. 전기로 산화슬래그 굵은 골재는 규격을 만족하는 일본 H사의 골재를 사용하였다. 골재의 유리석회 함유량은 0.3%로 팝아웃 및 분말화의 가능성은 없다.

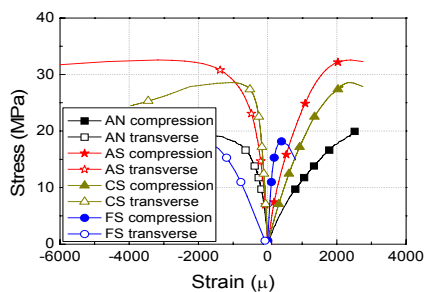
콘크리트의 압축강도는 실험체 모두 28MPa을 목표로 배합하였으나 아직 전기로 산화 슬래그 골재를 이용한 콘크리트의 배합에 관한 설계 기준이 기초적 단계라 강도의 차이가 발생하였다. 주철근과 전단철근은 각각 D19($f_y=361\text{MPa}$)와 D10($f_{wy}=344\text{MPa}$)을 사용하였다.

2.1.2 실험체 상세 및 실험 방법

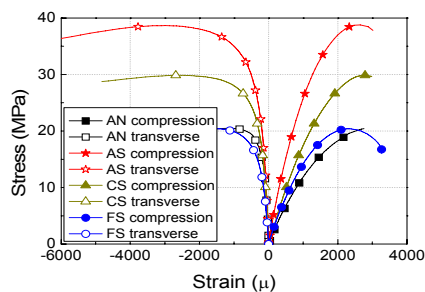
골재의 특성에 기인한 부착 거동과 내력의 차이를 비교하기 위하여 <표 2>에 나타난 바와 같이 4 종류의 콘크리트를 배합하여 실험체를 제작하였다. 사용된 골재의 종류에 따라 천연 골재만을 사용한 B-AN 실험체와 전기로 산화 슬래그 골재만을 사용한 B-AS 실험체, 그리고 전기로 산화 슬래그 굵은 골재 및 잔 골재를 각각 사용한 B-CS와 B-FS 실험체를 제작하였다. 실험체의 형상은 길이 2200mm,

<표 1> 전기로 산화슬래그 골재의 물리적 특성

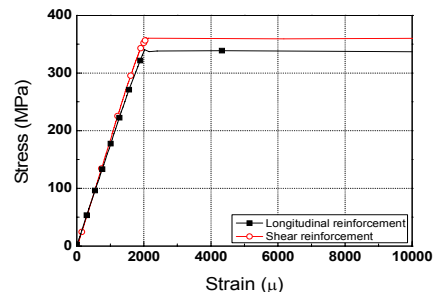
Test item	Electric arc furnace slag aggregate			
	Coarse aggregate		Fine aggregate	
	Standard	Test result	Standard	Test result
Unit volume weight (kg/l)	≥ 1.6	2.02	≥ 1.8	2.60
Oven density (g/cm ³)	3.1 ~ 4.0	3.48	3.1 ~ 4.0	3.85
Absorption ratio (%)	≤ 2.0	1.45	≤ 2.0	0.90
Percentage of solid volume (%)	-	58.8	-	68.4
F.M.	-	7.00	-	2.92



(a) 실험 전 콘크리트



(b) 실험 후 콘크리트



(c) 철근

[그림 2] 사용 재료의 응력-변형률 관계

<표 2> 부착 실험체 일람표

Specimens	Aggregate		f_{ck} (MPa)	Longitudinal reinforcement	Shear reinforcement
	Coarse aggregate	Fine aggregate			
B-AN	Natural	Natural	20.3	4D-19 $f_y = 361.0$ MPa	D10@50mm $f_{wy} = 344.2$ MPa
B-AS	Slag*	Slag*	35.5		
B-CS	Slag*	Natural	28.7		
B-FS	Natural	Slag*	18.2		

* Slag aggregate: Electric arc furnace slag aggregate

단면 250×400mm로서 배근 상세 및 와이어 스트레인 게이지(WSG)의 부착 위치를 [그림 3]에 나타내었다. 실험 구간은 실험체 좌우상하의 4개소에 위치하고 있으며 4번의 실험이 가능하도록 제작하였다. 실험 구간의 양 경계면에는 균열 유도 홈을 설치하여 여기서 발생한 균열로 인하여 실험 구간의 힘 전달은 오직 철근과 콘크리트와의 부착력에 의해서만 가능하도록 하여 부착 파괴를 유도하였다. 주철근 및 전단보강근에는 스트레인 게이지를 붙여 철근의 변형률을 측정하였으며, 이를 이용하여 실험 구간의 주철근에 작용하는 부착력과 전단보강근의 응력 상태를 계측하였다.

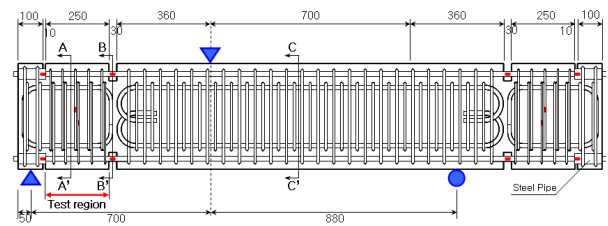
실험체의 부착 파괴 이전에 휨 파괴가 선행하는 것을 방지하기 위하여 주근을 2단으로 배근하였으며, 전단보강근을 상대적으로 조밀하게 배근하여 전단 파괴가 부착 파괴보다 선행하는 것을 방지하였다. 또한 시험 구간 단부의 철근이 지지 반력에 의한 구속을 받지 않도록 강관을 이용하여 피복 콘크리트와의 부착을 분리하였다.

가력 장치 및 실험 방법은 [그림 4]에 나타내었다. 가력 방법은 Ichinose식 단순보형 실험 방법⁶⁾을 이용하였으며, 실험체의 처짐을 측정하기 위하여 가력지점 위치의 실험체 하단에 2개의 LVDT를 설치하였다. 또한, 내·외측 철근의 미끄러짐 및 부착 거동의 차이를 계측하기 위하여 [그림 5]에서와 같이 내·외측 철근에 각각 LVDT를 설치하였다.

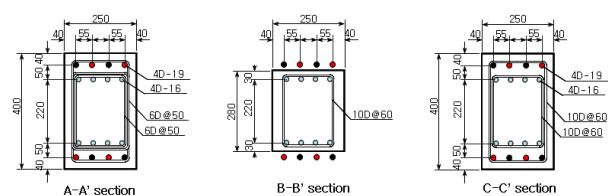
2.2 실험 결과

2.2.1 전단력-처짐 관계

실험에서 구한 각 실험체의 전단력-처짐 관계를 [그림 5]에 나타내었다. 부착 파괴까지의 전체적인 거동은 모든 실험체에서 유사하게 나타났으며, 최대 내력은 전기로 산화 슬래그 골재만을 사용한 B-AS 실험체, 전기로 산화 슬래그 굵은 골재를 사용한 B-CS 실험체, 천연골재만을 사용한 B-AN 실험체, 전기로 산화 슬래그 잔골재를 사용한 B-FS 실험체의 순으로 나타났다. <표 2>의 콘크리트 압축강도와 비교하여 살펴보면 압축강도가 높을수록 최대 내력이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

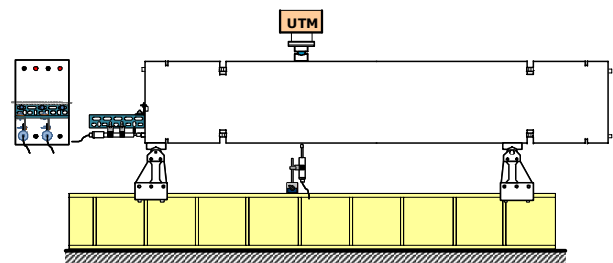


(a) 철근배근 및 게이지 위치

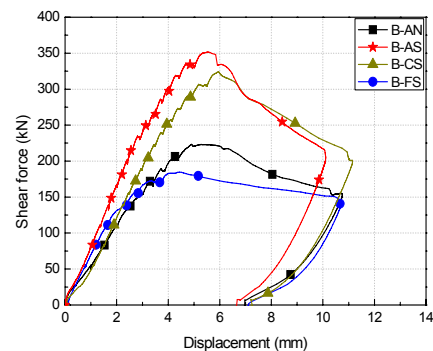


(b) 단면 상세

[그림 3] 부착 실험체 상세



[그림 4] 부착 실험체 설치 현황



[그림 5] 전단력-처짐 관계

최대 하중 이후의 내력 감소 구배를 살펴보면 최대 내력과 마찬가지로 B-AS 실험체, B-CS 실험체, B-AN 실험체, B-FS 실험체의 순으로 크게 나타나고 있어 콘크리트의 압축강도가 높을수록 최대하중 이후의 내력 감소 기울기가 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

2.2.2 균열 양상

파괴 후 실험체별 균열 상황을 [그림 6]에 나타내었다. 모든 실험체에서 공통적으로 가력 초기에 실험구간 경계면의 균열 유도 홈에서 휨 균열이 발생하였으며, 균열 유도 홈에서 발생한 균열로 인하여 실험 구간 내에서 힘의 전달은 오직 철근과 콘크리트의 부착력에 의존하게 된다.

하중이 증가함에 따라 휨 균열은 경사 균열로 성장하였으며 새로운 경사 균열도 다수 발생하였다. 이와 함께 실험 구간의 주철근 위치를 따라서 부착 균열이 발생하였으며, 이후 균열이 성장하여 최종적으로는 주철근의 미끄러짐이 급격하게 증가되어 부착 파괴에 이르렀다.

실험 구간에서의 균열 중 부착 균열 발생 상황을 [그림 6]에서 보면 천연 골재만을 사용한 B-AN 실험체에서 가장 적게 발생하였으며, 전기로 산화 슬래그 골재만을 사용한 B-AS 실험체에서는 가장 많이 발생한 것을 알 수 있다.

2.2.3 철근의 변형률 분포

실험구간에 있는 주철근의 변형률 분포를 [그림 7]에 나타내었다. 변형률 분포도는 [그림 3]에 나타난 바와 같이 실험구간 양 경계면의 균열 유도 홈에 위치한 주철근에 부착된 스트레인 게이지로 측정된 값을 이용하여 나타내었다. 그림에서 가는 실선은 최대 내력 이전의 상황을 의미하며, 굵은 실선은 최대 내력 상황을, 점선은 최대 내력 이후의 상황을 보여주고 있다. 선의 기울기는 실험구간 양단의 응력 차이로 실험구간에 작용하는 철근과 콘크리트 사이의 부착력을 의미한다.

변형률 분포도의 기울기를 살펴보면 모든 실험체에서 공통적으로 내력의 증가와 함께 기울기가 점점 커지면서

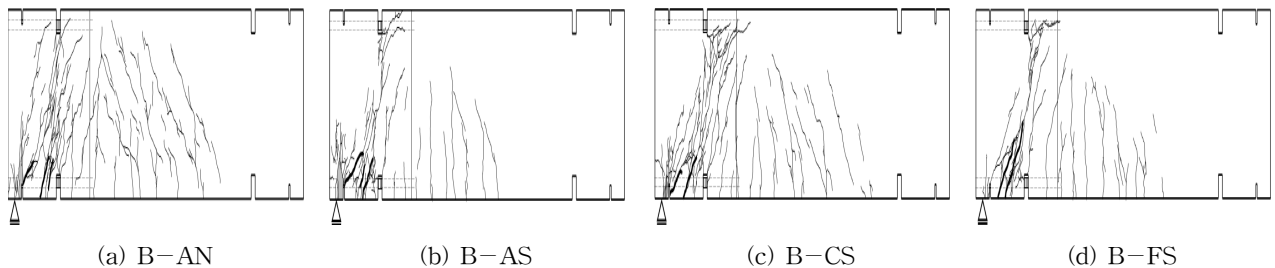
최대 내력 부근에서 최대 기울기를 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 최대 내력 이후 점선의 기울기가 점점 작아지는 것으로 실험체의 최대 내력 상태에서 부착 열화가 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 즉, 균열에 의한 부착 파괴(미끄러짐에 의한 파괴)로 인하여 실험체가 최대 내력에 도달하였음을 의미한다.

외측 주철근의 변형률을 살펴보면 천연 골재만을 사용한 B-AN 실험체와 전기로 산화 슬래그 잔골재를 사용한 B-FS 실험체에서는 최대 변형률이 0.001 내외인 것에 비하여 전기로 산화 슬래그 골재만을 사용한 B-AS 실험체와 전기로 산화 슬래그 굵은 골재를 사용한 B-CS 실험체에서는 최대 변형률이 0.002 정도로 전기로 산화슬래그 굵은 골재가 사용된 B-AS와 B-CS 실험체에서 더 큰 내력을 발휘하였음을 알 수 있다. 내측 주철근의 경우 모든 실험체에서 최대 변형률이 0.001 내외로 계속되어 실험체 사이에 큰 차이를 보이지 않았다. 이로부터 내측 주철근이 외측 주철근 보다 낮은 부착 내력을 발휘하였음을 알 수 있다.

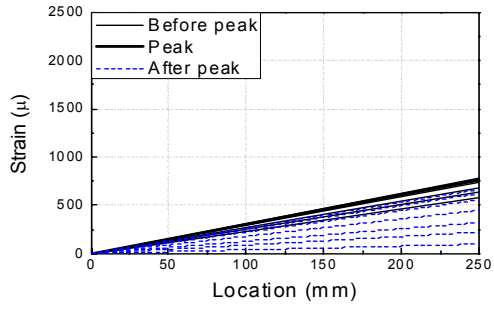
2.3 부착응력-미끄러짐 관계

실험에서 측정된 주근의 변형률 분포를 토대로 각 실험체의 부착 응력을 구하였으며, 이와 함께 콘크리트 압축강도에 의한 부착 강도의 차이를 예측하기 위하여 각각의 실험체에 대하여 Fujii-Morita 식⁷⁾에 의한 부착강도(이하 τ_{fm})를 산정하였다. 이들 계산의 결과는 <표 3>에 나타내었으며, τ_{fm} 은 압축강도 순인 B-AS, B-CS, B-AN, B-FS 실험체의 순으로 부착 강도가 계산되었다.

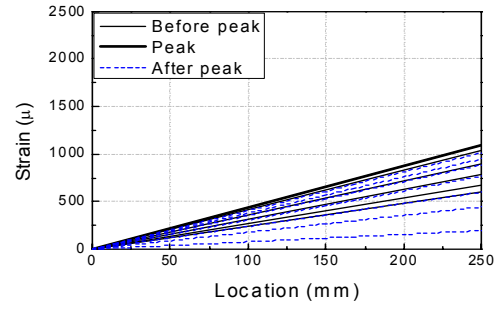
<표 3>에 나타낸 바와 같이, 실험결과에서 외측 주철근의 부착강도의 크기는 압축강도와 동일한 순서로 나타났으나, 해석결과와 비교하였을 때 B-AN과 B-FS 실험체에서는 거의 유사한 값을 나타내는 것에 비하여 B-AS와 B-CS 실험체에서는 실험에서 측정된 값이 해석결과 보다 약 1.5배 이상 크게 나타났다.



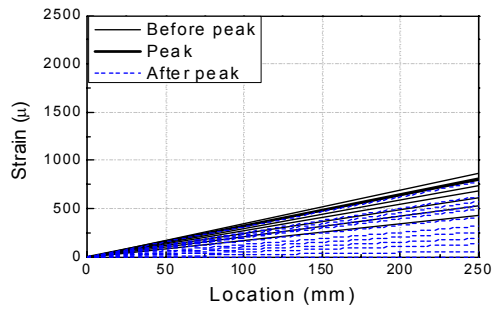
[그림 6] 부착파괴 후 균열양상



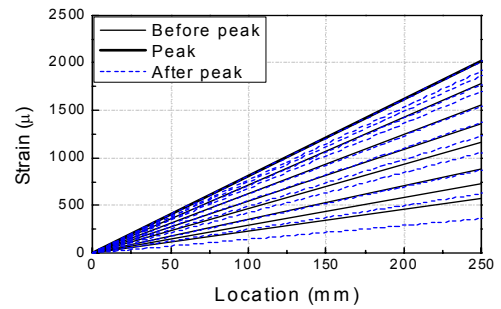
(a) B-AN (내측)



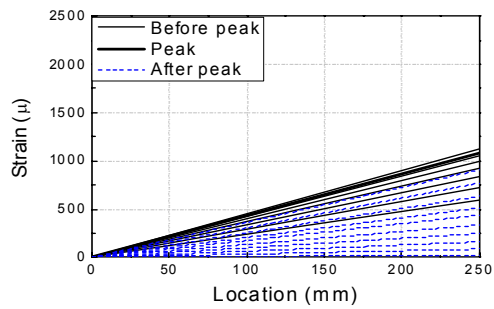
(b) B-AN (외측)



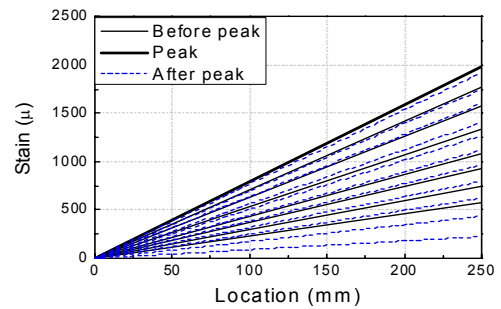
(c) B-AS (내측)



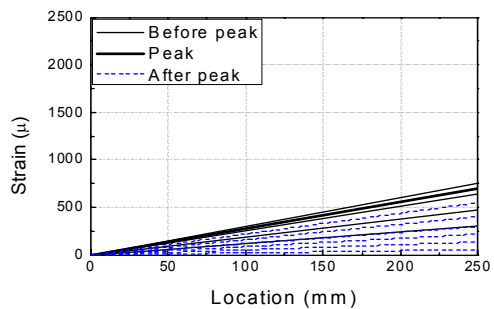
(d) B-AS (외측)



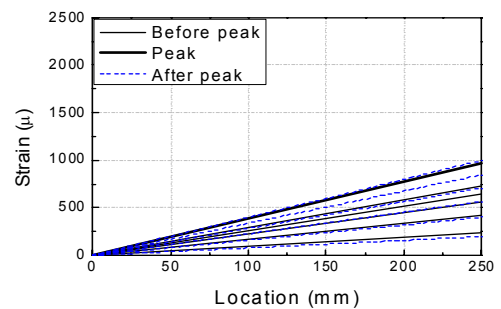
(e) B-CS (내측)



(f) B-CS (외측)



(g) B-FS (내측)



(h) B-FS (외측)

[그림 7] 주철근의 변형률 분포

<표 3> 부착 실험결과 및 해석결과

Specimens	τ_{exp} (MPa)		τ_{fm}^* (MPa)	Failure mode
	Outside	Inside		
B-AN	3.79	2.69	3.43	Bond
B-AS	7.00	2.99	4.54	Bond
B-CS	6.87	3.88	4.08	Bond
B-FS	3.46	2.60	3.25	Bond

* τ_{fm} : bond stress calculated from Fujii-Morita equation

실험구간에서의 부착응력은 평균 부착응력 개념을 이용하여 다음과 같이 구하였다.

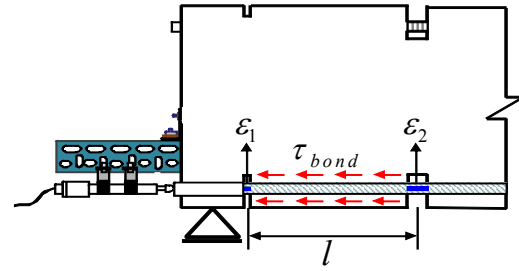
$$\tau_{bond} = \frac{(\epsilon_2 - \epsilon_1) \cdot E_s \cdot A_{st}}{\Sigma\psi \cdot l} \quad (1)$$

여기서 ϵ_1 과 ϵ_2 는 1과 2지점에서의 철근 변형률, E_s 는 철근의 탄성계수(MPa), A_{st} 는 철근의 단면적(mm²), $\Sigma\psi$ 는 철근 공칭둘레의 합, l 은 실험구간의 길이이다.

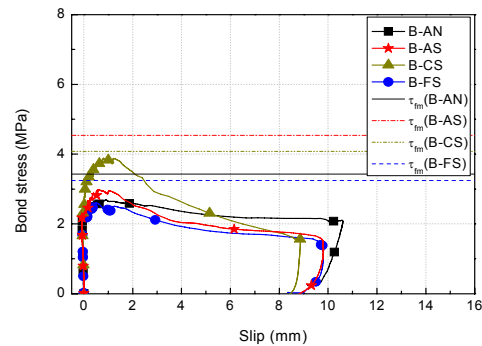
주철근의 미끄러짐 양은 [그림 8]과 같이 인장철근 단부에 설치한 LVDT와 주철근에 부착한 스트레인 게이지로부터 측정된 값을 이용하여 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$slip = LVDT - \frac{(\epsilon_1 + \epsilon_2)}{2} \cdot l \quad (2)$$

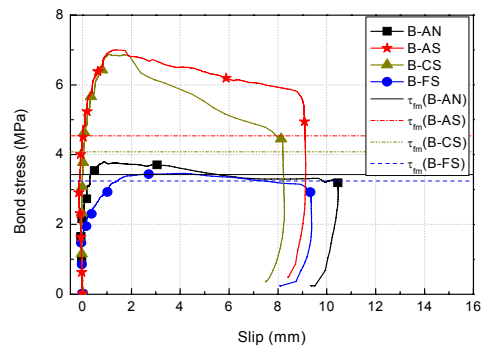
[그림 9]은 각 실험체의 부착응력과 미끄러짐 관계에 대한 실험결과를 나타내고 있다. 콘크리트 압축강도를 고려하여 부착 강도의 차이를 비교할 수 있도록 Fujii-Morita 식으로 산정한 부착강도(τ_{fm})를 함께 나타내었다. [그림 9(a)]와 [그림 9(b)]는 각각 내측 및 외측 주철근의 부착응력과 미끄러짐 사이의 관계를 나타내고 있으며 모든 실험체에서 내측 주철근의 부착강도가 외측 주철근보다 낮게 나타나고 있다. 또한 내측 주철근의 경우 미끄러짐 1mm 전후에서 최대 부착강도에 도달하는 것에 반해, 외측 주철근의 경우 미끄러짐 량 1mm와 2mm 사이에서 최대 부착강도가 발휘되고 있음을 알 수 있다. 이는 실험체의 부착 열화가 내측 주철근에서 시작하여 외측 주철근으로 전이된 것을 의미한다. 이것은 내측 주철근의 경우 외측 주철근에 비하여 횡보강근에 의한 구속이 상대적으로 불리할 뿐만 아니라, 링텐션 영역(ring-tension)이 내측 주철근에서 서로 겹치므로 부착 균열이 상대적으로 발생하기 쉬운 구조이기 때문이라 판단된다.



[그림 8] 미끄러짐 측정 방법



(a) 내측 주철근



(b) 외측 주철근

[그림 9] 평균 부착응력-미끄러짐 관계

외측 주철근의 경우 [그림 9(b)]를 보면 전기로 산화 슬래그 골재만을 사용한 B-AS 실험체와 전기로 산화 슬래그 굵은 골재를 사용한 B-CS 실험체의 부착강도가 천연골재만을 사용한 B-AN 실험체와 전기로 산화슬래그 잔 골재를 사용한 B-FS 실험체의 경우보다 약 1.8배 이상 크게 나타났다. 콘크리트 압축강도의 영향을 고려하여 τ_{fm} 과 비교하여보면 B-AN과 B-FS 실험체의 경우 실험에서 측정된 부착강도와 τ_{fm} 이 거의 유사한 값을 나타내고 있지만 B-AS와 B-CS 실험체에서는 실험에 의해 측정된 부착 강도가

τ_{fm} 보다 1.5배 이상 크게 상회하는 것으로 나타났다.

이상의 결과를 종합하여 보면 전기로 산화 슬래그 굵은 골재를 사용한 실험체에서 우수한 부착 성능을 나타내는 것을 알 수 있으며 이는 골재의 특성에 기인한 것으로 생각된다. 즉, 전기로 산화 슬래그 굵은 골재는 파쇄 골재로서 입형이 거칠기 때문에 미끄러짐에 대한 저항이 유리하며, 밀도가 높은 중량 골재이므로 주변의 잔 골재와 시멘트 페이스트 등에 대한 구속 효과가 높아 전반적으로 부착 강도의 증가를 가져온 것이라 판단된다.

3. 전기로 산화슬래그 골재를 사용한 RC 보의 휨 성능 평가

3.1 실험 계획

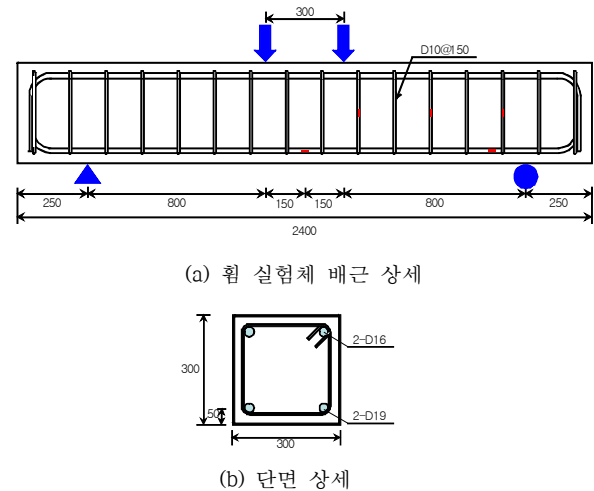
3.1.1 사용 재료

전기로 산화슬래그 골재를 적용한 실험체의 휨 성능을 평가하기 위하여 총 4체의 실험체를 제작하였다. 실험체에 사용된 콘크리트는 2장에서 기술한 부착 실험체와 동일하다. 인장철근은 항복강도 493.7MPa인 D19철근을 사용하였으며, 압축철근으로는 항복강도가 462.3MPa인 D16을 각각 2대씩 사용하였다. 전단철근은 항복강도가 460MPa인 D10 철근을 이용하였다.

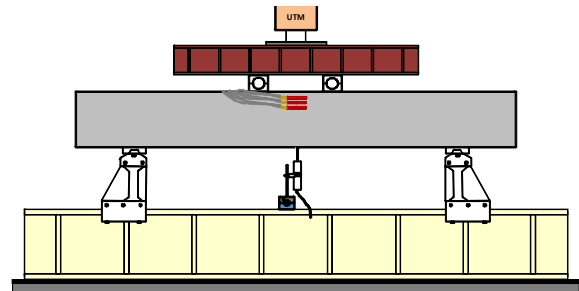
3.1.2 실험체 상세 및 실험 방법

골재의 특성에 기인한 휨 거동 및 균열 발생 상황의 차이를 비교하기 위하여 <표 4>에 나타낸 바와 같이 네 종류의 콘크리트를 배합하여 실험체를 제작하고 실험을 수행하였다. 사용된 골재의 종류에 따라 천연 골재만을 사용한 F-AN 실험체와 전기로 산화슬래그 골재만을 사용한 F-AS 실험체, 그리고 전기로 산화슬래그 굵은 골재를 사용한 F-CS 실험체와 전기로 산화슬래그 잔 골재를 사용한 F-FS 실험체로 획하였다.

실험체 상세 및 가력 방법은 [그림 10]과 [그림 11]에 나타내었다. 실험체 형상은 길이가 2400mm, 단면이 300×300mm이며 지점간 거리는 1,900mm이다. 실험체의 휨 파괴를 유도하기 위하여 인장 철근비는 $\rho=0.0076$ 으로 하였으며 전단 파괴를 방지하기 위하여 전단보강근은 150mm 간격으로 배근하였다. 주철근과 전단보강근에는 스트레인 게이지를 붙여 철근의 응력 상태를 계측하였다. 또한 천연 골재 및 전기로 산화슬래그 골재의 사용에 따른 하중 단계별 콘크리트 중립축 깊이와 모멘트-곡률 관계 등의 변화 추이를 살펴보기 위하여 실험체 중앙 상부에서 2, 4, 6cm 떨



[그림 10] 휨 실험체 상세



[그림 11] 휨 실험체 설치 현황

<표 4> 휨 실험체 일람표

Specimens	Aggregates		f'_{ck} (MPa)	Longitudinal reinforcement		Shear reinforcement
	Coarse	Fine		Tension	Compression	
F-AN	Natural	Natural	20.3	2-D19 $f_y=493.7\text{MPa}$	2-D16 $f_y=462.3\text{MPa}$	D10@150mm $f_{wy}=460.0\text{MPa}$
F-AS	Slag	Slag	35.5			
F-CS	Slag	Natural	28.7			
F-FS	Natural	Slag	18.2			

어진 위치에 콘크리트 게이지를 부착하였다.

실험체는 단순지지형태로 4점 가력 하였으며, 가력점 사이의 거리는 300mm로 하였다. 실험체의 최대 변형이 발생하는 위치인 실험체의 중앙부 하단에는 두 개의 LVDT를 설치하여 처짐량을 측정하였다.

3.2 실험결과 및 분석

3.2.1 휨 실험결과

실험에서 측정한 각 실험체의 모멘트-처짐 관계는 [그림 12]에 나타내었다. 모든 실험체는 인장 철근의 항복이후 연성거동을 보였다. 또한 이들 실험체의 균열은 공통적으로 중앙부에서 휨 균열이 발생한 후 양 단부로 진전되어 휨 경사 균열로 발전하였다. 이후 내력이 증가하면서 균열이 성장하여 균열폭이 증대되었으며 최대 변위 단계에서 콘크리트 압축 연단에 압괴가 발생하였다.

휨 균열이 최초로 발생하기 이전의 초기 강성은 전기로슬래그 골재만을 사용한 F-AS 실험체, 전기로슬래그 굵은 골재를 사용한 F-CS 실험체, 전기로슬래그 잔 골재를 사용한 F-FS 실험체, 천연골재만을 사용한 F-AN 실험체의 순서로 큰 값을 나타내었다. 특히 전기로 산화슬래그 잔 골재를 사용한 실험체의 경우 천연 골재만을 사용한 실험체보다 높은 초기 강성을 나타내었다. 이는 골재의 밀도가 높은 것에 기인한 것으로 판단된다.

3.2.2 모멘트-곡률 관계

실험체의 모멘트와 곡률 관계를 [그림 13]에 나타내었다. 곡률은 [그림 10]에 표시된 실험체 중앙부의 철근 게이지와 [그림 11]에 표시된 실험체 표면에 부착된 콘크리트 게이지 값을 이용하여 구하였다. [그림 13]에서 exp는 실험에서 측정된 모멘트-곡률 관계를 나타내며, ana는 휨 해석에 의한 해석결과를 나타낸다.

실험결과와 해석결과를 비교하여 보면, 모든 실험체가 인장철근이 최초 항복할 때의 강도를 상회하여 휨 성능을 발휘하였음을 알 수 있다. 또한 최대모멘트에 대한 실험결과와 해석결과와의 비(실험/해석)는 평균 1.24로 나타났다.

이처럼 실험결과와 해석결과와의 차이가 다소 높은 이유는 휨 해석에서 콘크리트의 인장력 부담을 무시하고 철근의 영향만을 고려하였기 때문으로 판단된다.

3.2.3 균열폭

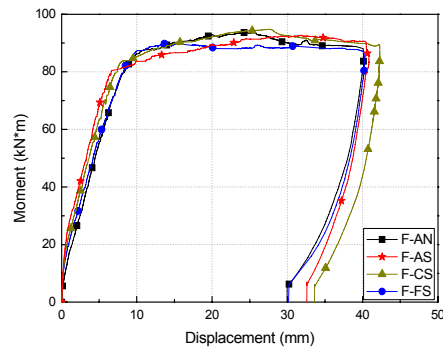
가력 종료 후의 실험체별 최종 균열 상황과 실험체의 균열 번호는 [그림 14]에 나타내었으며, 균열폭 성장 과정

은 [그림 15]에 나타내었다. [그림 15(a)]는 천연 골재만을 사용한 F-AN 실험체의 균열폭 성장을 나타내며 전체

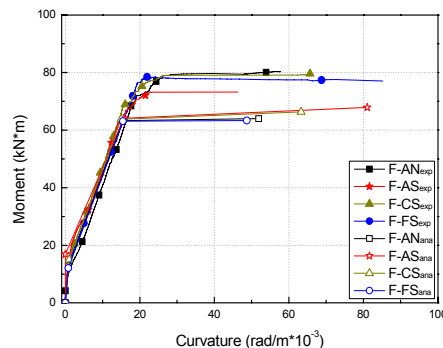
휨 균열 11개 중에서 대표적인 균열 4개를 대상으로 균열폭의 성장을 측정하였다.

[그림 15]에서 보는 바와 같이 균열폭은 모멘트의 증가와 함께 서서히 증가하다가 인장철근이 항복함에 따라 급격하게 증가하였다. 이 때 가력지점 하단의 2개 균열(1, 4번)만 폭이 크게 증가하고 나머지 균열은 1mm 이하의 폭으로 유지되는 것을 알 수 있다. 이는 휨 변형에 있어서 수반되는 실험체 하단의 인장 변형이 1번 균열과 4번 균열의 영역에서 대부분 이루어졌기 때문으로 판단된다.

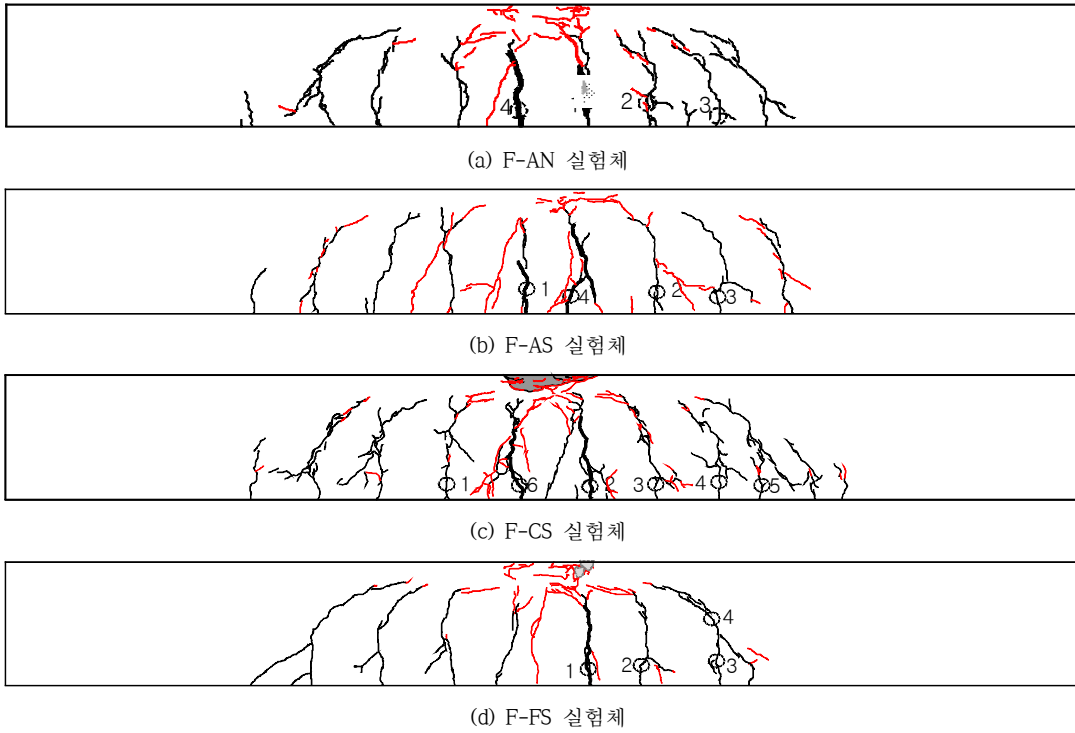
[그림 15(b)]는 전기로슬래그 골재만을 사용한 F-AS 실험체의 균열폭 성장을 나타낸다. 전체 균열 11개 중 4개를 대상으로 균열폭의 성장을 측정하였으며 F-AN 실험체와 마찬가지로 모멘트의 증가와 함께 서서히 증가하던 균열폭이 인장철근 항복 이후 급격하게 증가하였다. 측정된 균열폭 중 1번, 2번, 4번의 3개 균열의 폭이 크게 벌어지고 나머지 균열의 폭은 1mm 이하에 머무르고 있다. 이는 전기



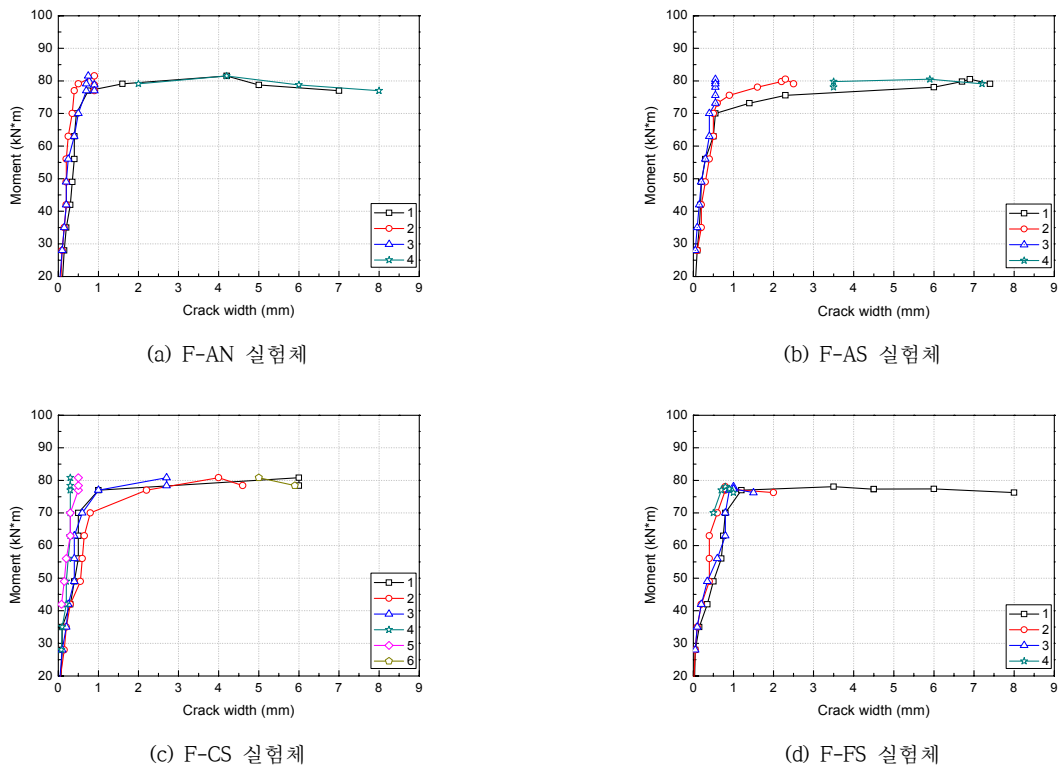
[그림 12] 휨 실험체의 모멘트-변위 관계



[그림 13] 모멘트-곡률 관계에 대한 실험 및 해석결과



[그림 14] 힘 실험체의 파괴 후 균열 상황



[그림 15] 균열폭 성장 과정

로 산화슬래그 골재만을 사용한 F-AS 실험체에서는 휨 변형에 수반된 실험체 하단의 인장 변형을 가력 지점 하단의 1번, 2번, 4번 균열의 영역에서 함께 부담한 것으로 생각할 수 있으며, 인장 변형을 부담하는 영역이 천연 골재만을 사용한 F-AN 실험체보다 확장된 것을 알 수 있다.

[그림 15(c)]는 전기로 산화슬래그 굵은 골재를 사용한 F-CS 실험체의 균열폭 성장을 나타낸다. 전체 균열 11개 중 6개 균열을 대상으로 균열폭의 성장을 측정하였다. 측정된 균열폭의 변화를 살펴보면 가력지점에서 멀리 떨어진 4번, 5번 균열을 제외한 나머지 균열의 폭이 인장철근의 항복과 함께 급격하게 증대되었으며, 이로 인하여 가력 지점 하부뿐만 아니라 보다 확장된 영역에서 인장 변형을 부담하고 있는 것을 알 수 있다. 다시 말해서 전기로 산화슬래그 굵은 골재를 사용한 F-CS 실험체에서는 휨 변형에 수반된 실험체 하단의 인장 변형을 몇 개의 지배적인 균열이 부담하는 것이 아니라 발생된 휨 균열이 고루 나누어 부담하는 것을 알 수 있다.

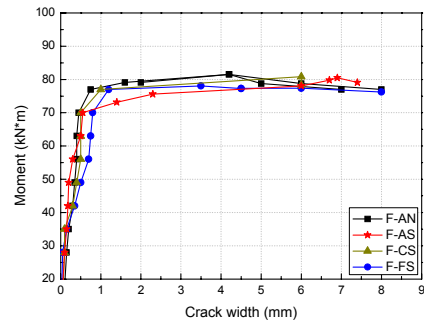
[그림 15(d)]는 전기로 산화슬래그 잔 골재를 사용한 F-FS 실험체의 균열폭 성장을 나타낸다. 전체 균열 8개 중 3개 균열을 대상으로 4곳에서 균열폭의 성장을 측정하였다. 인장철근 항복 이후 가력지점 하단의 1번 균열의 폭만이 크게 증대되고 나머지 균열의 폭은 2mm 이내로 성장한 것을 알 수 있다. 여기에서 휨 변형에 있어서 수반되는 실험체 하단의 인장 변형을 1번 균열의 영역에서 대부분 부담하였으며 전체적으로 다른 실험체의 경우 보다 균열의 수가 적다는 것을 알 수 있다.

[그림 16]은 각 실험체의 균열 성장 추이를 나타낸다. 실험체가 항복 모멘트에 도달한 이후 균열폭이 급격하게 증가하는 경향은 모든 실험체에서 동일하게 나타났지만 인장 변형을 부담하는 영역이 넓은 실험체일수록 최대 균열폭이 작아짐을 알 수 있다.

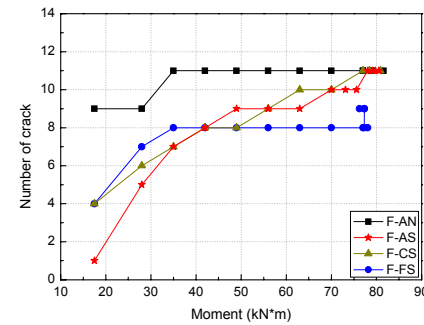
3.2.4 균열 수

[그림 17]에 나타난 균열 수와 모멘트의 관계를 살펴보면 최대 모멘트에서의 균열 수는 F-FS 실험체를 제외하고는 동일하지만 균열이 증가하는 경향은 실험체마다 다른 양상을 보이고 있다. 천연 골재만 사용한 F-AN 실험체의 경우는 초기에 대부분의 균열이 발생하였으며 실험 종료 시까지 새로운 균열의 발생은 거의 관찰되지 않았다.

전기로 산화슬래그 골재만을 사용한 F-AS 실험체는 철근 항복 이전에 발생된 균열 수가 가장 적게 관찰되었으며 하중의 증가에 따라 균열 개수가 증가하여 최대 변위 단계에서는 천연 골재만을 사용한 F-AN 실험체와 동일한 수의



[그림 16] 모멘트-균열폭 관계



[그림 17] 휨 균열 개수-모멘트 관계

균열이 관찰되었다.

전기로 산화슬래그 굵은 골재만을 사용한 F-CS 실험체의 균열수 증가 양상은 전기로 산화슬래그 골재만을 사용한 F-AS 실험체와 비슷한 경향을 나타내었다. 인장철근이 항복하기 이전에 발생된 균열 개수는 F-AS 실험체보다 조금 더 많이 발견되었지만 하중의 증가에 따라 새로운 균열이 발생하여 최대 변위 단계에서는 F-AS 및 F-AN 실험체에서와 동일한 수의 균열이 관찰되었다.

전기로 산화슬래그 잔 골재만을 사용한 F-FS 실험체는 인장철근 항복 이전의 F-CS 실험체와 비슷한 수준의 균열 개수를 보였다. 그러나 하중이 증가함에 따라 균열의 개수에는 거의 변화 없이 천연 골재만을 사용한 F-AN 실험체와 유사한 경향을 나타내었다. 최대변위단계에서 관찰된 균열 개수는 다른 모든 실험체에 비하여 적게 관찰되었다.

[그림 17]의 휨 균열 개수-모멘트 관계에서 부재가 항복하기 이전에는 전기로 산화슬래그 골재가 사용된 F-AS, F-CS, F-FS 실험체의 균열수가 천연 골재만을 사용한 F-AN 실험체보다 적게 발생한 것을 알 수 있다. 이 결과로부터 전기로 산화슬래그 골재의 사용으로 천연 골재의 경우보다 균열 발생이 억제되었음을 확인할 수 있으며, 이는 사용성 측면에서 보다 유리할 것으로 판단된다.

4. 결론

전기로 산화슬래그 골재의 철근콘크리트 구조부재 적용을 위하여 콘크리트용 골재를 실험 변수로 철근콘크리트 보 부재의 부착 및 휨 실험을 실시한 결과 다음의 사실을 확인할 수 있었다.

1) 전기로 산화슬래그 골재를 사용한 실험체는 천연 골재를 사용한 실험체보다 동등 이상의 부착 성능을 발휘하는 것으로 나타났다.

2) 전기로 산화슬래그 굵은 골재를 적용한 실험체의 부착 강도는 압축강도의 영향을 고려하여 산정된 Fujii-Morita 식에 의한 해석결과보다 1.5배 이상의 높은 부착강도를 나타내었다. 이것은 전기로 산화슬래그 골재의 입형이 거칠어 미끄러짐에 대한 저항이 유리하며, 높은 밀도에 기인하여 주변의 잔 골재와 시멘트 페이스트를 보다 효과적으로 구속하였기 때문으로 판단된다.

3) 전기로 산화슬래그 골재를 사용한 실험체는 천연 골재를 사용한 실험체와 유사한 휨 성능을 발휘하는 것을 확인할 수 있었다.

4) 전기로 산화슬래그 골재를 사용한 실험체는 천연 골재를 사용한 실험체보다 항복 이전에 발생한 균열 개수가 적게 발생하여 사용성 측면에서 이로운 것으로 판단된다.

5) 전기로 산화슬래그 굵은 골재를 사용한 실험체의 경우 휨 변형에 수반되는 인장측 변위를 몇 개의 지배적인 균열이 부담하는 것이 아니라 보다 확장된 영역에서 균열들이 고루 부담하는 것으로 나타났다.

“電気炉酸化スラグ細骨材を用いるコンクリートの設計施工指針(案)・同解説,” 日本建築学会, 2005, pp.71~72.

6. 前田 匡樹,
“鉄筋コンクリート部材の付着割列破壊に関する研究,”
修士学位論文, 東京大学, 1994, pp.3-1~3-23.
7. Fujii, S. and Morita, S., “Effect of Transverse Reinforcement on Splitting Bond Strength,” Transactions of the Japan Concrete Institute, Vol.3, 1981, pp.237~244.
8. 岡田 清 外, コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店, 1987, pp.407~418.

참고문헌

1. 한국철강협회, “2008년 세계 조강 생산 현황,” 2009.
2. 류득현, 임지영, 이용준, 김상우, 김길희 “콘크리트용 전기로 산화 슬래그 골재를 사용한 RC 보의 부착 성능에 관한 실험적 연구,” 콘크리트학회 논문집, Vol.21, No.5, 2009. 10, pp.581~588.
3. 김길희, 류득현, 김상우, 임지영, 이정미, 이용준, “전기로 산화슬래그 골재를 사용한 RC 보의 휨 거동에 관한 실험적 연구,” 대한건축학회 논문집, Vol.25, No.10, 2009. 10, pp.27~34.
4. 한국표준협회, “콘크리트용 전기로 산화 슬래그 잔골재,” 한국표준협회, 2007, 22pp.
5. 日本建築学会,