



콘크리트용 전기로 산화 슬래그 골재를 사용한 RC 보의 부착 성능에 관한 실험적 연구

류득현¹⁾ · 임지영²⁾ · 이용준²⁾ · 김상우²⁾ · 김길희^{2)*}

¹⁾유진기업 기술연구소 ²⁾공주대학교 건축공학부

Experimental Study on the Bond Capacity of RC Beams Using Electric Arc Furnace Oxidizing Slag Aggregates

Deug-Hyun Ryu,¹⁾ Ji-Young Lim,²⁾ Yong-Jun Lee,²⁾ Sang-Woo Kim,²⁾ and Kil-Hee Kim^{2)*}

¹⁾EUGENE Group, Goyang 412-480, Korea

²⁾Dept. of Architectural Engineering, Kongju National University, Cheonan 330-717, Korea

ABSTRACT An amount of electric arc furnace slag, by-products generated in iron manufacture, is being increased. Therefore, it is required to recycle the electric arc furnace slag. Currently, it is possible to use the electric arc furnace slag as the aggregates of the concrete through the insurance of volume stability but not in the past because of the expansibility of f-CaO and f-MgO. In this study, simple beam tests via Ichinose method were performed to estimate the bond properties of reinforced concrete (RC) beams using the electric arc furnace slag. The results of the test showed that the specimens using the electric arc furnace oxidizing slag aggregates have similar or more bond capacity relative to the specimen of natural aggregates. Especially, bond capacity of the specimens using the slag aggregates was almost one and a half times higher than a specimen using natural aggregates.

Keywords : electric arc furnace, oxidizing slag, slag aggregates, aggregates for concrete, bond capacity

1. 서 론

국내의 골재는 대부분 콘크리트용 골재로 소모되고 있으며, 건설 산업의 비약적인 성장과 더불어 골재의 수요도 함께 증가하고 있다. 그러나 천연골재 자원은 이미 고갈되거나 이용이 제한되어 현재는 쇄석 골재를 대량 사용하고 있으나, 이 또한 환경 보전의 차원에서 규제가 강화되고 있어 골재 수급은 더욱 어려워지고 있다. 이에 따라 고갈되어가는 천연골재를 대체할 수 있는 새로운 골재 자원의 개발이 시급한 실정이다.^{1,2)}

철강 생산 공정 중 한가지인 전기로에서 발생하는 전기로 슬래그는 철강 산업의 부산물로서 철강 생산량이 증가함에 따라 그 발생량이 꾸준히 증가하고 있다. 즉, 전기로에서 생산되는 철강 생산량은 Fig. 1과 같이 전체 조강 생산량의 절반까지 꾸준히 증가하여 2007년 기준 약 2만4천톤에 이른다. 이 중 전기로 슬래그가 약 10% 이상 다량으로 발생되고 있어 효율적인 재활용 방안이 요구되고 있다.³⁾

전기로 슬래그는 유리석회(f-CaO) 및 유리마그네시아

(f-MgO)에 기인한 팽창성이 우려되어 대부분이 노반재로 활용되어 왔다. 그러나 전기로 슬래그를 콘크리트용 골재로 활용하기 위한 연구가 꾸준히 진행되어 일본의 경우 체적 안정성을 확보한 콘크리트용 전기로 슬래그 골재를 생산하여 사용하고 있으며, 국내의 경우 2007년 7월 콘크리트용 전기로 산화 슬래그 잔골재에 관한 한국 산업규격(KS F 4571)⁴⁾이 제정되면서 천연골재의 대체 골재로서 전기로 슬래그 골재를 사용할 수 있는 근거가 마련되었다. 하지만 지금까지 국내에서 진행된 전기로 슬래그 골재에 관련된 연구는 에이징(aging)으로 대표되는 안정화 처리 방법에 관련된 것이 주를 이루고 있으며, 규격을 만족하는 전기로 산화 슬래그 골재를 철근콘크리트 구조 부재에 적용하기 위한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다.^{1,5-7)}

이 연구에서는 전기로 슬래그 골재를 철근콘크리트 구조물에 적용하기 위해 선결해야 할 부착 특성에 주목하였다. 이를 위하여 천연골재, 전기로 슬래그 잔골재 및 굵은골재를 사용한 RC 보의 부착 거동의 차이에 기초한 전기로 슬래그 골재의 부착 특성을 고찰하였다.

2. 전기로 산화 슬래그 골재

전기로 슬래그는 철 스크랩을 용해·정련하는 과정에

*Corresponding author E-mail: kimkh@kongju.ac.kr

Received January 28, 2009, Revised June 16, 2009

Accepted June 26, 2009

©2009 by Korea Concrete Institute

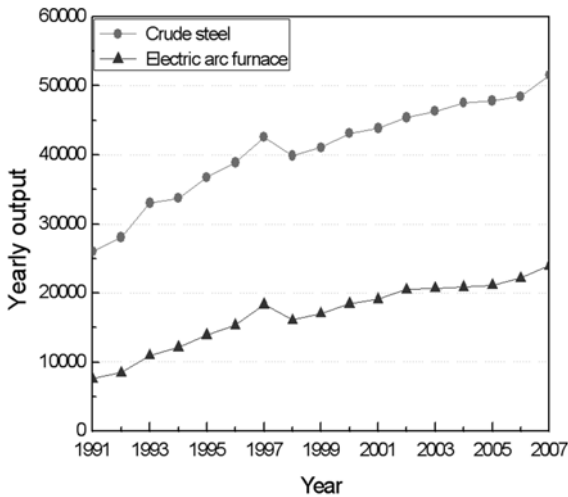


Fig. 1 Yearly output of steel in Korea

서 발생되며, Fig. 2에 나타낸 것처럼 산화 정련에서 발생하는 산화 슬래그와 환원 정련에서 발생하는 환원 슬래그가 있다. 전기로 슬래그의 구성 성분을 보면 주성분이 석회(CaO) 및 실리카(SiO₂)로 구성되어 보통의 암석·광물 등의 조성 과 일치하며, 화학적으로 일반적인 포틀랜드시멘트나 콘크리트와 동일한 알칼리성을 나타내어 골재 자원으로서의 활용 가능성이 높다.^{3,8)} 그러나 환원 슬래그의 경우 유리석회의 함유율이 높아 콘크리트의 팽창 파괴를 일으킬 위험성이 높기 때문에 콘크리트용 골재로는 사용할 수 없다. 유리석회는 철 스크랩을 정련하는 과정에서 부원료로 사용되는 생석회(CaO)가 충분하게 슬래그화 되지 않고 잔존하는 불안정한 석회분으로 물과 반응하여 수산화칼슘으로 바뀌는 과정에서 2배 가까이 체적이 팽창한다. 이러한 반응이 콘크리트와 같은 강체 내부에서 일어날 경우 골재의 팽창에 의해 콘크리트 외부의 균열이나 뒹 아웃 현상을 발생시킬 우려가 있으므로 유리석회가 혼입되어있는 환원 슬래그는 콘크리트용 골재로 사용할 수 없다.

과거에는 전기로 내에서 두 정련이 함께 이루어지고 있었으므로 산화·환원 슬래그의 분리가 어려웠고, 환원 슬래그에 포함된 유리석회 등의 성분에 기인한 팽창붕괴

성 때문에 전기로 슬래그를 콘크리트용 골재로서 이용하는 것이 불가능하였다. 그러나 현대의 전기로 제강법에서는 Fig. 2와 같이 산화·환원 공정이 명확하게 구분되어 유리석회 및 유리마그네시아의 함유량이 거의 없는 산화 슬래그만을 분리하는 것이 가능하게 되었다.⁹⁾ 따라서 산화 슬래그를 콘크리트용 골재로서 활용하는 것이 가능하게 되었으며, 일본의 경우 공정 관리를 통하여 콘크리트의 팽창열화 문제를 해결하고 골재로서 유효하게 활용하고 있다.¹⁰⁾

전기로 산화 슬래그 골재는 천연골재에 비하여 절건 밀도와 단위용적질량이 높은 특징을 갖고 있다. 이러한 특징을 고려하여 전기로 산화 슬래그 골재는 중량 콘크리트용으로 이용될 수 있으며 지하 구조물이나 옹벽 등에 적용하여 구조물의 중력 저항에 대한 효율성을 높이고 부력에 대한 안정성을 확보할 수 있다. 또한, 높은 밀도로 인한 차폐성의 향상을 고려하여 원자력 발전소나 X선 검사장 등에 차폐 콘크리트로 활용하는 등 콘크리트구조물에 전기로 산화 슬래그를 다양하게 적용할 수 있다.

3. 실험 계획

3.1 사용 재료

전기로 산화슬래그의 화학적 조성 과 물리적 특성은 각각 Tables 1과 2에 나타내었으며, 모든 특성치는 기준^{4,10)}을 만족하고 있다. 실험에 사용된 콘크리트와 철근의 상세는 Table 3과 Fig. 3에 나타내었다. 천연골재의 잔골재와 굵은골재는 국내에서 생산되는 세척사와 쇄석을 이용하였다. 전기로 산화 슬래그 굵은골재는 아직 국내에서 콘크리트용 골재 규격을 만족하는 골재가 생산되지 않고 있으므로 규격에 맞는 골재를 사용하기 위하여 일본 H

Table 1 Chemical composition of electric arc furnace slag (unit : %)

Classification	Fe ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	MnO
Electric arc furnace slag	21.2	26.7	17.7	5.3	12.2	7.9

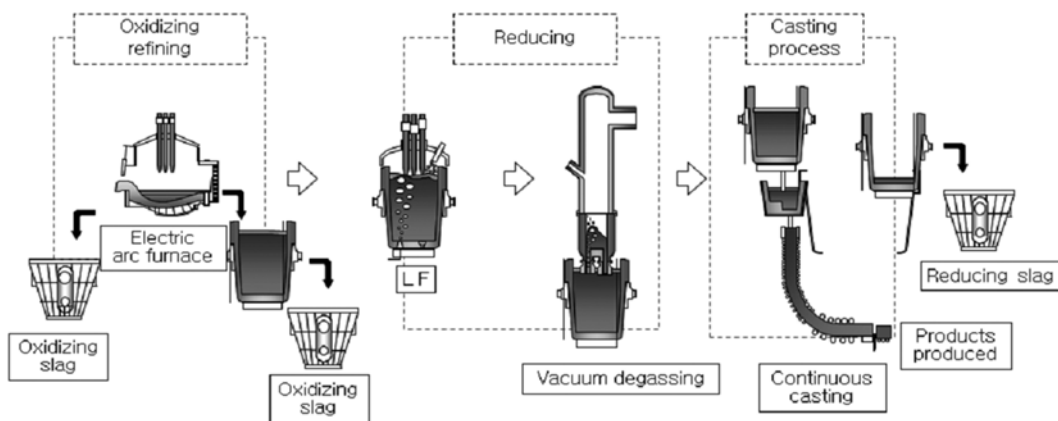


Fig. 2 Manufacturing process of electric arc furnace process

Table 2 Physical characteristics of electric arc furnace slag

Test item	Electric arc furnace slag aggregate			
	Coarse aggregate		Fine aggregate	
	Standard of quality	Test result	Standard of quality	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

Table 3 Properties of specimens

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

*Slag aggregate : electric arc furnace slag aggregate

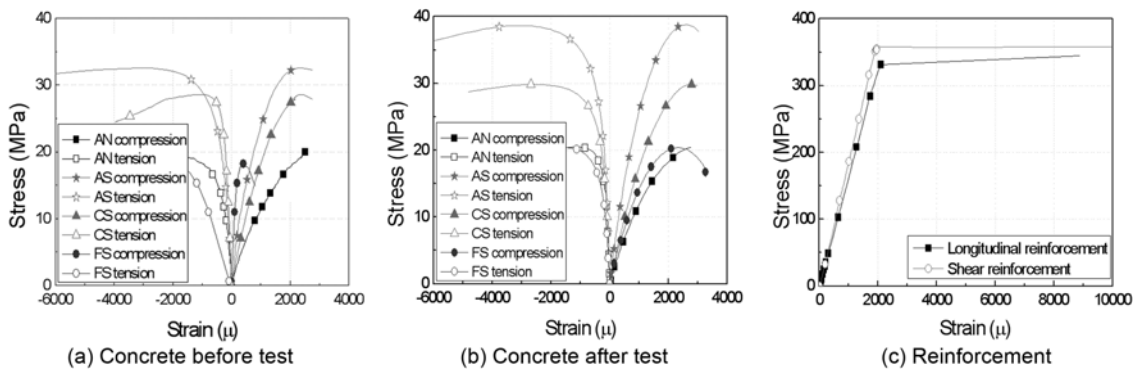


Fig. 3 Stress versus strain relationships of materials

사의 골재를 사용하였다. 골재의 f-CaO 함유량은 0.3%로 뽑아웃 및 분말화의 가능성은 없다.

콘크리트의 압축강도는 실험체 모두 28 MPa를 목표로 배합하였으나 아직 전기로 산화 슬래그 골재를 이용한 콘크리트의 배합에 관한 설계 기준이 기초적 단계이기 때문에 강도의 차이가 발생하였다. 철근은 주철근에 항복강도(f_y) 361 MPa의 D19 철근을, 전단보강근에 항복강도(f_{wy}) 344 MPa인 D10 철근을 이용하였다.

3.2 실험체 상세 및 실험 방법

골재의 특성에 기인한 부착 거동과 내력의 차이를 비교하기 위하여 Table 3에 나타난 바와 같이 4 종류의 콘크리트를 배합하여 실험체를 제작하였다. 사용된 골재의 종류에 따라 천연골재만을 사용한 AN 실험체와 전기로 산화 슬래그 골재만을 사용한 AS 실험체, 그리고 전기로 산화 슬래그 굵은골재 및 잔골재를 각각 사용한 CS와 FS 실험체를 제작하였다. 실험체의 형상은 길이 2,200 mm, 단면 250 × 400 mm로서 배근 상세 및 와이어 변형률계

이지(WSG)의 부착 위치를 Fig. 4에 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 변형률게이지를 붙여 철근의 변형률을 측정하였으며, 이를 이용하여 실험 구간의 주철근에 작용하는 부착력 및 전단보강근의 응력 상태를 계측하였다.

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

가력 장치 및 실험 방법은 Fig. 5에 나타난 것과 같다. 가력 방법은 Ichinose식 단순보형 실험 방법¹¹⁾을 이용하였으며, 실험체의 처짐을 측정하기 위하여 가력지점 위

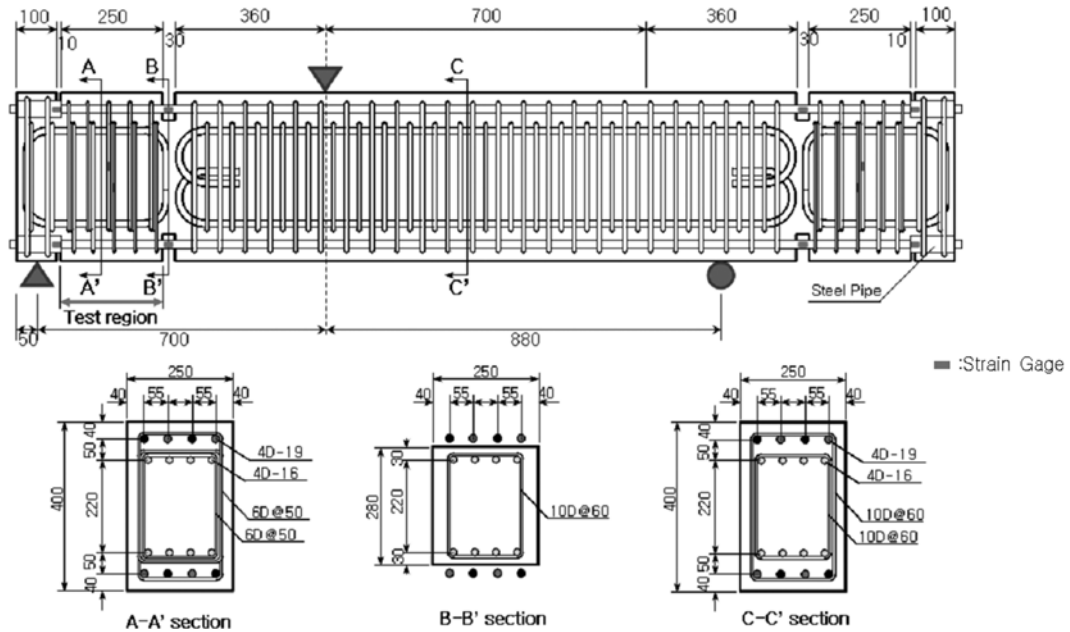


Fig. 4 Details of specimen

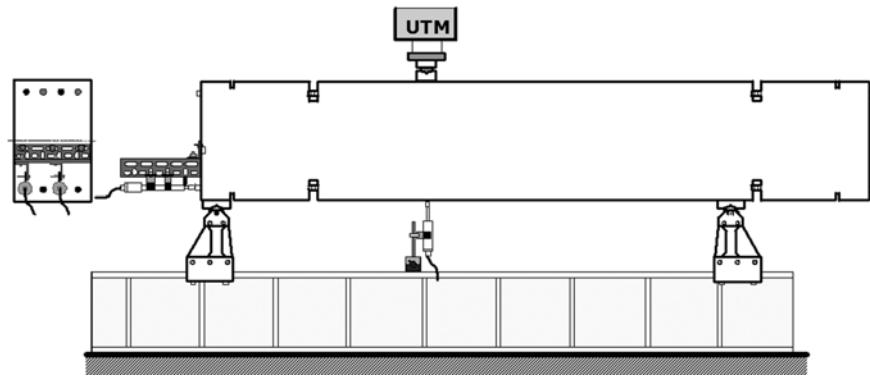


Fig. 5 Test setup

치의 실험체 하단에 2개의 LVDT를 설치하였다. 또한, 내·외측 철근의 미끄러짐 및 부착 거동의 차이를 계측하기 위하여 Fig. 5에서와 같이 내·외측 철근에 각각 LVDT를 설치하였다.

4. 실험 결과

4.1 전단력-처짐 관계

실험에서 구한 각 실험체의 전단력-처짐 관계를 Fig. 6에 나타내었다. 부착 파괴까지의 전체적인 거동은 모든 실험체에서 유사하게 나타났으며, 최대 내력은 전기로 산화 슬래그 골재만을 사용한 AS 실험체, 전기로 산화 슬래그 굵은골재를 사용한 CS 실험체, 천연골재만을 사용한 AN 실험체, 전기로 산화 슬래그 잔골재를 사용한 FS 실험체의 순으로 나타났다. Table 3의 콘크리트 압축강도와 비교하여 살펴보면 압축강도가 높을수록 최대 내력이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

최대 하중 이후의 내력 감소 구배를 살펴보면 최대 내

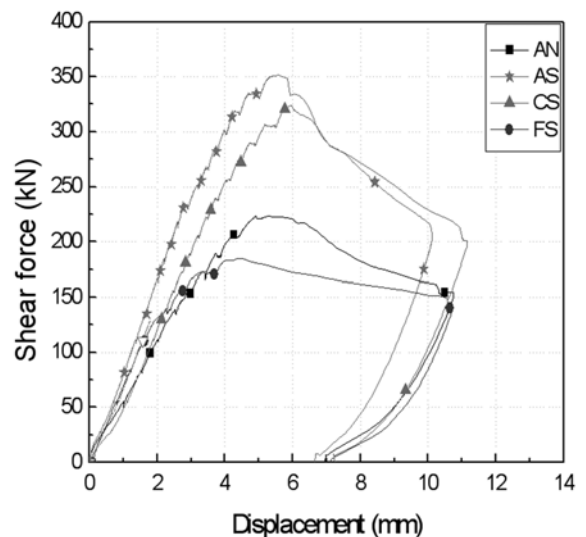


Fig. 6 Shear force versus displacement relationships

력과 마찬가지로 AS 실험체, CS 실험체, AN 실험체, FS 실험체의 순으로 크게 나타나고 있어 콘크리트의 압축강

도가 높을수록 최대하중 이후의 내력 감소 기울기가 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

4.2 균열 양상

가력 종료 후의 실험체별 최종 균열 상황을 Fig. 7에 나타내었다. 모든 실험체에서 공통적으로 가력 초기에 실험 구간 경계면의 균열 유도 홈에서 휨 균열이 발생하였으며, 균열 유도 홈에서 발생한 균열로 인하여 실험 구간 내에서 힘의 전달은 오직 철근과 콘크리트의 부착력에 의존하여 이루어지게 된다. 하중이 증가함에 따라 휨 균열은 경사 균열로 성장하였으며 새로운 경사 균열도 다수 발생하였다. 이와 함께 실험 구간의 주철근 위치를 따라서 부착 균열이 발생하였으며, 균열이 성장하여 최종적으로는 주철근의 미끄러짐이 급격하게 증가되어 부착 파괴에 이르렀다.

실험 구간에서의 균열 중 부착 균열발생 상황을 Fig. 7에서 보면 천연골재만을 사용한 AN 실험체에서 가장 적게 발생하였으며, 전기로 산화 슬래그 골재만을 사용한 AS 실험체에서는 가장 많이 발생한 것을 알 수 있다.

5. 철근의 변형률 분포

실험체 별 실험 구간 주철근의 변형률 분포를 Fig. 8에 나타내었다. 분포도는 Fig. 4에 나타난 것처럼 주철근 중 시험구간 양 경계면의 균열 유도 홈 위치에 붙인 변형률게이지로 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 이는 곧 이 구간에 작용하는 철근과 콘크리트 사이의 부착력을 의미한다.

변형률 분포도의 기울기를 살펴보면 모든 실험체에서 공통적으로 내력의 증가와 함께 기울기가 점점 커지면서 최대 내력 직전, 최대 내력 상태에서 최대 기울기를 나타내고 있다. 최대 내력 이후 점선의 기울기가 점점 작아지는 것으로 실험체의 최대 내력 상태에서 부착 열화가 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 이는 곧 균열에 의한 부착 파괴(미끄러짐에 의한)로 인하여 실험체가 최대 내력에 도달하였음을 의미한다.

외측 주철근의 변형률을 살펴보면 천연골재만을 사용

한 AN 실험체와 전기로 산화 슬래그 잔골재를 사용한 FS 실험체에서는 최대 변형률이 0.001 내외인 것에 비해 전기로 산화 슬래그 골재만을 사용한 AS 실험체와 전기로 산화 슬래그 굵은골재를 사용한 CS 실험체에서는 최대 변형률이 0.002 정도의 값으로 전기로 산화 슬래그 굵은골재가 사용된 AS와 CS 실험체에서 더 큰 내력을 발휘하였음을 알 수 있다. 내측 주철근의 경우 모든 실험체에서 최대 변형률이 0.001 내외로 측정되어 실험체 사이에 큰 차이를 보이지 않고 있으며, 전반적으로 외측의 경우보다 낮은 부착 내력을 발휘하고 있음을 알 수 있다.

6. 부착응력-미끄러짐 관계

실험에 의해 측정된 주철근의 변형률 분포를 토대로 각 실험체의 부착응력을 구하였으며, 이와 함께 콘크리트 압축강도에 의한 부착강도의 차이를 예측하기 위하여 각각의 실험체에 대하여 Fujii-Morita식¹²⁾에 의한 부착강도(이하 τ_{fm})를 산정하였다. 이들 계산의 결과는 Table 4에 나타내었다. τ_{fm} 을 보면 AS, CS, AN, FS 실험체의 순으로 부착강도가 크게 나타나고 있으며, 압축강도가 클수록 부착강도 역시 큰 값을 나타내고 있다.

실험에 의해 측정된 값 중 외측 주철근의 값을 보면 압축강도와 같은 순서로 크게 나타나고 있으나, τ_{fm} 값과 비교하였을 때 AN 실험체와 FS 실험체에서는 거의 유사한 값을 나타내는 것에 비해 AS 실험체와 CS 실험체에서는 실험에 의해 측정된 값이 τ_{fm} 보다 약 1.5배 이상 크게 나타나고 있다.

실험체의 부착 응력 및 미끄러짐량은 다음의 식을 이용하여 구하였다.

$$\tau_{bond} = \frac{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \cdot E_s \cdot A_{st}}{\Sigma \psi \cdot l} \quad (1)$$

$$slip = LVDT - \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{2} \cdot l \quad (2)$$

ε_1 : 인장단부의 주철근 변형률(Fig. 9참조)

ε_2 : 인장단부에서 250 mm 위치의 주철근 변형률(Fig. 9참조)

E_s : 철근의 탄성계수(MPa)

$\Sigma \psi$: 주철근 주장의 합(mm)

l : 실험구간 길이(250 mm)

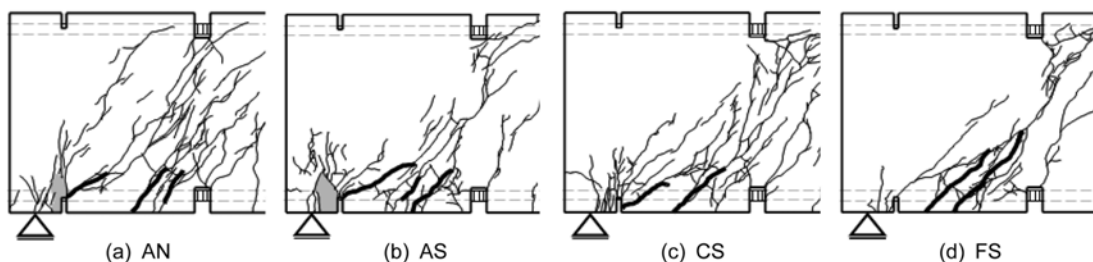


Fig. 7 Crack patterns of specimens at ultimate load

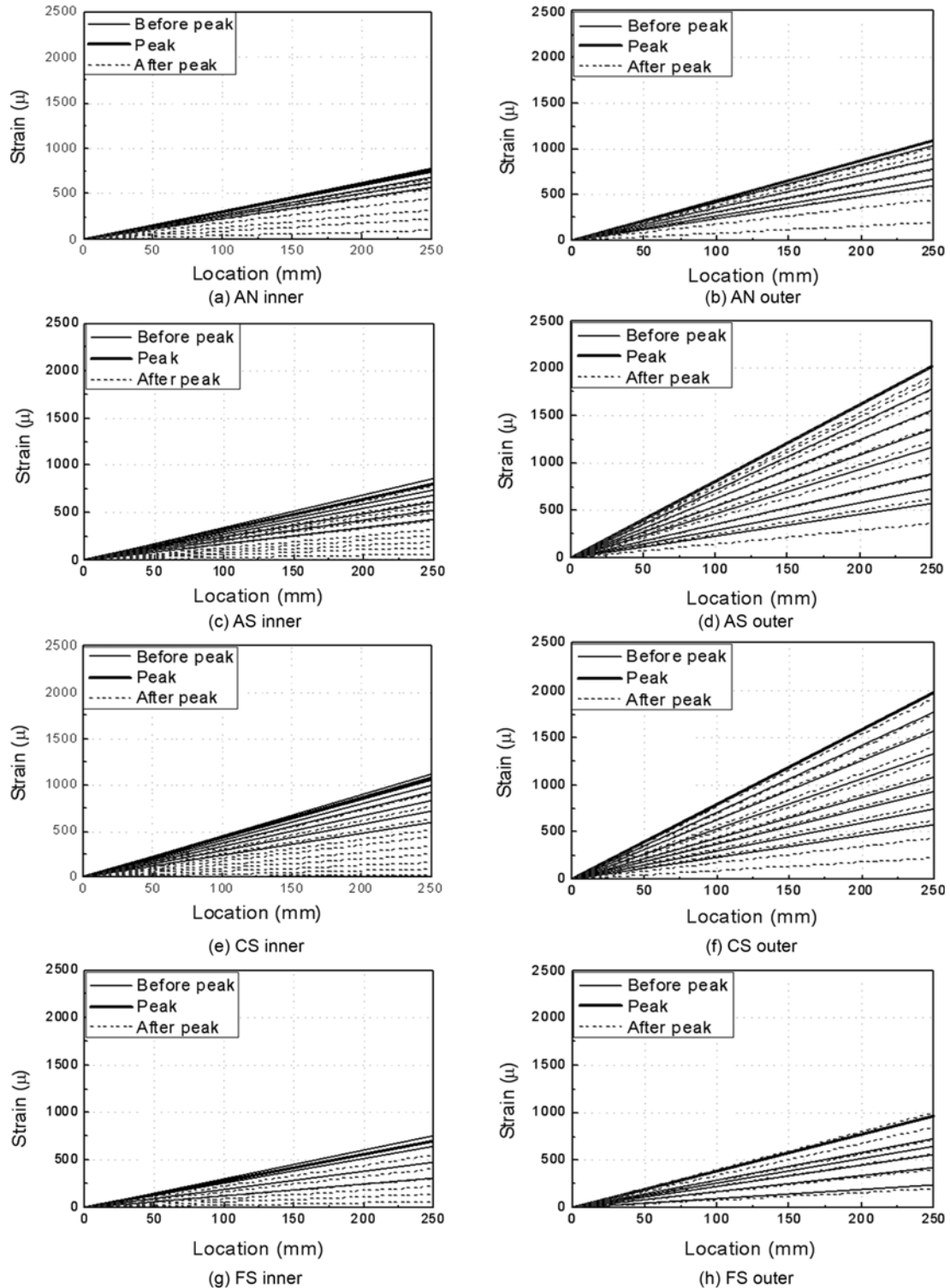


Fig. 8 Strain distributions of longitudinal reinforcement

실험 구간의 부착응력은 Fig. 9에 나타난 것처럼 평균 부착응력의 개념을 적용하여 식 (1)과 같이 산정할 수 있으며 시험 구간 양 경계면의 균열 유도 홈에 붙인 변형률게이지의 측정값을 이용하여 구하였다.

미끄러짐(slip) 양은 주철근에 붙인 변형률게이지와 시험체 단부에 설치한 LVDT의 측정값을 이용하여 식 (2)으로 구하였으며, ε_1 과 ε_2 에 의한 평균 변형률을 이용하여 계산하였다.

Fig. 10은 실험에 의해 측정된 각 실험체의 부착응력과 미끄러짐 관계를 나타내고 있으며, 콘크리트 압축강도를 고려하여 부착강도의 차이를 비교할 수 있도록 Fujii-Morita식으로 산정한 부착강도(τ_{fm})를 함께 나타내었다.

Fig. 10(a), (b)는 각각 내측 주철근과 외측 주철근의 부착응력과 미끄러짐 사이의 관계를 나타내고 있으며 모든 실험체에서 내측 주철근의 부착강도가 외측 주철근보다 낮게 나타나고 있다. 또한 내측 주철근의 경우 미끄러짐

Table 4 Test results of specimens

Specimens	τ_{fm}^* (MPa)	τ_{exp} (MPa)		Failure mode
		Outer steel bar	Inner steel bar	
AN	3.43	3.79	2.69	Bond
AS	4.54	7.00	2.99	Bond
CS	4.08	6.87	3.88	Bond
FS	3.25	3.46	2.60	Bond

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

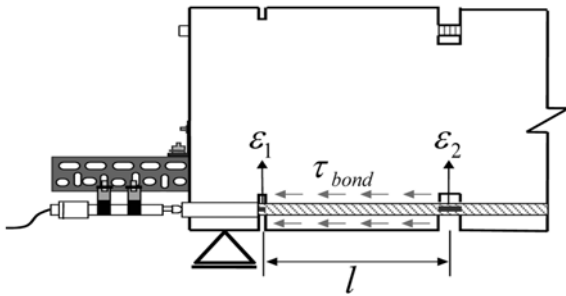


Fig. 9 Measuring method of slip

1 mm 전후에서 최대 부착강도에 도달하는 것에 반해, 외측 주철근의 경우 미끄러짐 량 1 mm와 2 mm 사이에서 최대 부착강도가 발휘되고 있음을 알 수 있다. 이는 실험체의 부착 열화가 내측 주철근에서 시작하여 외측 주철근으로 전이된 것을 의미한다. 이것은 내측 주철근의 경우 외측에 비하여 횡보강근에 의한 구속이 상대적으로 불리할 뿐만 아니라, 링텐션 영역(ring-tension)이 겹쳐 부착 균열이 상대적으로 발생하기 쉬운 상황이기 때문으로 판단된다.

외측 주철근의 경우 Fig. 10(b)를 보면 전기로 산화 슬래그 골재만을 사용한 AS 실험체와 전기로 산화 슬래그 굵은골재를 사용한 CS 실험체의 부착강도가 천연골재만을 사용한 AN 실험체와 전기로 산화 슬래그 잔골재를

사용한 FS 실험체의 경우보다 약 1.8배 이상 크게 나타나고 있다. 콘크리트 압축강도의 영향을 고려하여 τ_{fm} 과 비교하면 AN과 FS 실험체의 경우 실험에 의해 계측된 부착강도와 τ_{fm} 이 거의 유사한 값을 나타내고 있지만 AS와 CS 실험체에서는 실험에 의해 계측된 부착강도가 τ_{fm} 보다 1.5배 이상 크게 상회하는 것으로 나타났다.

이상의 결과를 종합하여 보면 전기로 산화 슬래그 굵은골재를 사용한 실험체에서 우수한 부착 성능을 나타내는 것을 알 수 있으며 이는 골재의 특성에 기인한 것으로 생각된다. 전기로 산화 슬래그 굵은골재는 파쇄 골재로서 입형이 거칠기 때문에 미끄러짐에 대한 저항이 유리하며, 밀도가 높은 중량 골재이므로 주변의 잔골재와 시멘트페이스트 등에 대한 구속 효과가 높아 전반적으로 부착강도의 증가를 가져온 것이라 판단된다.

7. 결 론

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

- 1) 전기로 산화 슬래그 골재를 적용한 실험체는 천연 골재를 사용한 경우보다 동등 이상의 부착 성능을 발휘하는 것으로 나타났다.
- 2) 전기로 산화 슬래그 굵은골재를 적용한 실험체의 부착 강도는 압축강도의 영향을 고려하여 산정된 Fujii-Morita 식의 값보다 1.5배 이상의 높은 부착강도를 나타내었으며, 이것은 전기로 산화 슬래그 골재의 입형이 거칠어 미끄러짐에 대한 저항이 유리하며, 높은 밀도에 기인하여 주변의 잔골재와 시멘트페이스트를 보다 효과적으로 구속하였기 때문이라 판단된다.
- 3) 전기로 산화 슬래그 잔골재를 사용한 실험체는 천

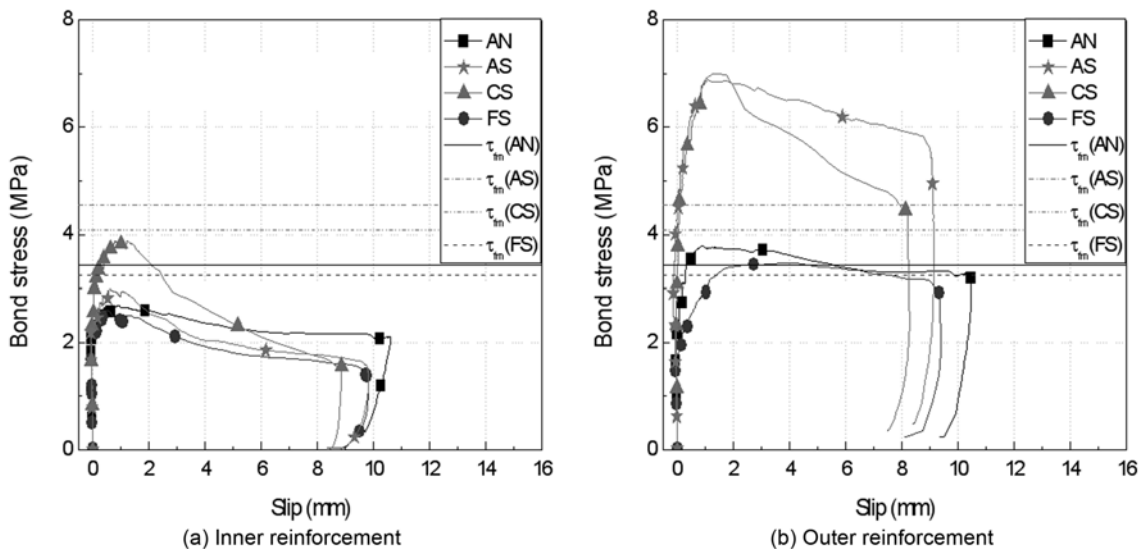


Fig. 10 Average bond stress versus slip relationships

연골재를 사용한 실험체와 비교하여 부착 성능에 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

이 연구의 결과 전기로 산화 슬래그 골재를 사용한 콘크리트의 부착 성능은 천연골재를 사용한 것과 유사하거나, 보다 우수한 것으로 나타났으며, 철근콘크리트 구조 부재에 전기로 산화 슬래그 골재를 적용하기 위해서 앞으로 휨 및 전단 성능을 확인하기 위한 추가 실험이 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

이 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역 혁신인력양성사업 및 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 연구 결과이며, 도움을 주신 일본 호시노 산상에 감사드립니다.

참고문헌

1. 이정국, 김완기, 소양섭, “전기로슬래그 골재를 이용한 시멘트 모르타르 및 콘크리트의 강도 특성,” 대한건축학회 추계학술발표대회 논문집(구조계), 21권, 2호, 2001, pp. 355~358.
2. 전수만, 윤현도, 최기선, 유영찬, 김궁환, “순환골재 콘크리트와 이형철근의 부착 특성,” 콘크리트학회 논문집, 20권, 2호, 2008, pp. 165~173.
3. 김길희, 임지영, 류득현, 최성우, “전기로 산화슬래그의 국내외 이용 사례,” 콘크리트학회지, 19권, 6호, 2007, pp. 51~52.
4. 한국표준협회, “콘크리트용 전기로 산화 슬래그 잔골재,” 한국표준협회, 2007, 22 pp.
5. 문한영, 유정훈, 윤희경, 이재준, “전기로슬래그 골재를 사용한 콘크리트의 강도에 대한 실험적 연구,” 대한토목학회 학술발표회 논문집(1), 1997, pp. 401~404.
6. 문한영, 유정훈, “콘크리트용 골재로서 전기로슬래그의 적용성에 대한 연구,” 콘크리트학회 논문집, 11권, 3호, 1999, pp. 101~111.
7. 유정훈, 최재진, “전기로슬래그 골재의 잔류팽창성에 대한 고찰,” 한국건설순환자원학회 논문집, 2권, 1호, 2006, pp. 124~131.
8. 조성현, “급냉 제강슬래그 잔골재를 사용한 특수 모르타르 및 콘크리트의 개발과 실용화 방안,” 박사학위논문, 충남대학교, 2005, pp. 17~18.
9. 國府 勝郎, 四谷 進, “電氣爐酸化スラグ骨材の概要,” 日

- 本コンクリート工學誌, Vol. 41, No. 8, 2003, pp. 3~7.
10. 日本建築學會, “電氣爐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,” 日本建築學會, 2005, pp. 71~72.
 11. 前田 匡樹, “鐵筋コンクリート部材の付着割列破壊に関する研究,” 修士學位論文, 東京大學, 1994, pp. 3-1~3-23.
 12. S, Fujii., et al, “Effect of Transverse Reinforcement on Splitting Bond Strength,” Transactions of the Japan Concrete Institute, Vol. 1, No. 3, 1981, pp. 237~244.

부 록

Fujii-Morita가 제안한 부착강도 식은 다음과 같다.

$$\tau_{fm} = \tau_{co} + \tau_{st}$$

여기서 τ_{co} 와 τ_{st} 는 각각 콘크리트와 횡보강근의 부착 강도 기여분으로 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$\tau_{co} = (0.096b_i + 0.134)\sqrt{f_{ck}}$$

$$\tau_{st} = 7.8 \frac{k \cdot A_{st}}{s \cdot N \cdot d_b} \sqrt{f_{ck}} \leq 0.27 \sqrt{f_{ck}}$$

여기서 b_i 는 부착할릴 패턴에 따라 결정되는 상수로

$$b_i = \min(b_{si}, b_{ci})$$

$$b_{si} = \frac{b}{N \cdot d_b} - 1 \text{ (for side split)}$$

$$b_{ci} = \sqrt{2} \left(1 + \frac{C_s + C_b}{d_b} \right) - 1 \text{ (for corner split)}$$

여기서, b = 단면의 폭, N = 주근의 개수, s = 횡보강근의 간격, d_b = 주근의 지름, C_s = 옆면 피복 두께, C_b = 아랫면 피복 두께, A_{st} = 1쌍의 횡보강근 단면($2 \times A_w$, A_w : 횡보강근의 단면적), f_{ck} = 콘크리트 압축강도, 그리고 $k = 1.0$ ($b_i = b_{si}$ 인 경우) 또는 $\sqrt{2}$ ($b_i = b_{ci}$ 인 경우)이다. 하단근의 경우 τ_{fm} 에 1.22를 곱한다.

요 약 전기로 슬래그는 철강 생산 공정에서 발생하는 산업 부산물로서 그 발생량이 꾸준히 증가하고 있어 효율적인 재활용 방안이 요구되고 있다. 전기로 슬래그는 f-CaO 및 f-MgO에 기인한 팽창성이 우려되어 대부분이 노반재로 사용되었지만, 현재는 체적안정성을 확보한 전기로 산화 슬래그를 콘크리트용 골재로 사용하는 것이 가능하게 되었다. 이 연구에서는 콘크리트용 전기로 산화 슬래그 골재를 사용한 RC 보의 부착 특성에 관하여 고찰하기 위해 부착 파괴를 유도한 Ichinose식 단순보형 실험을 실시하였다. 실험 결과, 전기로 산화 슬래그 골재를 사용한 실험체는 천연골재를 사용한 경우보다 동등 이상의 부착 성능을 발휘하는 것으로 나타났다. 특히, 전기로 산화 슬래그 굵은골재를 사용한 실험체는 콘크리트 압축강도의 영향을 고려하여도 천연골재보다 1.5배 이상의 높은 부착 강도를 나타내었다.

핵심용어 : 전기로, 산화 슬래그, 슬래그 골재, 콘크리트용 골재, 부착 성능