

잔골재를 급냉제강슬래그로代替한 콘크리트의 특성에 관한 實驗的 研究[†]

[†]金南旭 · 朴民旭* · 裴主星**

清州大學校 理工大學 土木環境工學科, 專任講師

*全北大學校 大學院 土木工學科, 碩士課程

**全北大學校 工科大學 土木工學科 教授, 工業技術研究센터

An Experimental Study on the Properties of Concrete Substituting the Rapid Chilled Steel Slag for Fine Aggregate[†]

[†]Nam-wook Kim*, Min-wook Park* and Ju-seong Bae**

Department of Civil and Environmental Engineering, Cheongju University, Full-time Lecturer

**Department of Civil Engineering, Graduate school, Chonbuk National University, M.E Candidate*

***Department of Civil Engineering, Chonbuk National University, RCIT, Professor*

요 약

최근 들어 경제성장과 산업의 발달로 사회기반시설 및 주거시설 등의 건설이 활발히 이루어지면서 콘크리트용 골재의 사용량이 급증하고 있다. 그러나 천연골재는 점차 고갈되고 그 채취에 대한 엄격한 환경적인 규제 때문에 골재의 부족이 건설분야의 큰 문제로 대두되고 있어 이를 대체할 수 있는 대체재의 개발이 시급한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 철강생산 과정에서 부산물로 발생하는 제강슬래그를 잔골재의 대체재로 활용하기 위하여 유리석회를 대폭 감소시킨 급냉제강슬래그를 잔골재로 활용한 콘크리트의 물성 및 역학적 시험결과를 비교 고찰하여 그 활용 가능성과 적정대체율을 규명하였다.

주제어 : 사회기반시설, 급냉제강슬래그, 유리석회, 대체재, 잔골재

Abstract

Along with the increased social infrastructures and reconstruction, the demand for aggregate, which is used in concrete, has rapidly increased. However, there are problems due to the exhaustion of natural aggregate resources, and strict restrictions. In this study, the possibility of using rapid chilled steel slag as a substitutive material of fine aggregate is determined from the property test and mechanical test for the concrete that is made with rapid chilled steel slag, which highly decreases the free CaO, the main problem of the steel slag.

Key words : social infrastructures, rapid chilled steel slag, free CaO, substitutive material, fine aggregate

1. 서 론

최근 들어 산업의 발달과 경제성장으로 사회기반시설 및 주거시설등의 건설이 활발히 진행되어 매년 콘크리트의 사용량이 급증함에 따라 소요되는 천연골재의 부족현상이 건설분야의 큰 문제로 대두되고 있어 대체골재의 개발이 시급히 요구되고 있다. 현재 굵은골재의 경

우, 강자갈을 대신하여 쇄석의 사용으로 이를 대체하고 있으나 천연잔골재인 강모래는 부족량의 고갈뿐만 아니라 채취 시 환경적인 규제가 엄격하여 대체자원으로서 주로 바닷모래를 사용하고 있다. 2003년 건설교통부의 통계에 따르면 잔골재의 수급량은 약 61,848천/m³이며, 이중 바닷모래의 사용량은 약 33,698천/m³ 정도로 약 55%를 차지하고 있으나 바닷모래를 사용할 경우 함유된 염분의 영향으로 콘크리트의 침식 및 철근부식 등으로 인한 콘크리트 구조물의 내구성 저하의 우려가 있기

[†] 2007년 9월 4일 접수, 2007년 11월 5일 수리

* E-mail: concrete@cju.ac.kr

때문에 대체 잔골재의 개발이 요구되고 있다.¹⁾ 이러한 상황에서 최근 들어 철강생산 과정에서 대량으로 발생되는 산업부산물인 제강슬래그를 천연잔골재의 대체골재로 활용하려는 연구가 꾸준히 진행되어 왔다.²⁻⁷⁾ 그러나 제강슬래그는 제조 특성 상 성분 중에 고로슬래그 및 유리석회(Free CaO)를 0.1%~20%까지 다양하게 함유하고 있는데, 일반적으로 유리석회의 함유량이 1% 이상일 경우 콘크리트의 체적팽창을 유발하고, 콘크리트 구조물의 붕괴를 초래하는 결과를 가져올수도 있다.⁸⁾ 따라서 제강슬래그를 대체골재로 재활용하기 위해서는 유리석회의 함유량을 감소시키는 과정이 필수적이며 이를 위해서 다양한 방법들이 시도되고 있는데, 그 중에서 제강슬래그의 에이징(Aging) 처리 혹은 급냉방법이 대표적이라고 할 수 있다. 에이징처리방법은 용융된 제강슬래그를 서냉시킨 후 야적장에서 약 6개월에서 1년간 대기중에 방치하여 유리석회의 함유량을 자연적으로 감소시키는 방법으로 현재 도로용 노반재의 확보에 이용되고 있으나 처리시간이 많이 소요되며 야적장 확보 등 높은 처리비용이 문제점으로 지적되고 있다. 또한 최근에는 용융상태의 제강슬래그를 서냉시키지 않고 고속의 공기를 이용하여 급냉시켜 입형이 구형에 가까운 급냉제강슬래그(Rapid chilled steel slag)를 제조하는 급냉공법이 개발되었는데 이는 물이 분사되는 분사기류내에서 전기로에서 배출되는 슬래그를 통과시켜 아토마이징(atomizing)처리를 하여 제조하는 것이다.⁹⁾ 이 방법은 에이징처리방법에 비해서 처리시간이 대폭 단축되며 야적장 확보에 따른 문제점이 없을 뿐만 아니라, 유리석회의 함유량도 대폭 감소되는 것으로 알려지고 있어 앞

으로 제강슬래그의 재활용에 널리 사용될 것으로 기대된다. 그러나 지금까지 콘크리트용 잔골재로 제강슬래그를 활용하는 연구는 미비하며 체계적으로 이루어지지 못하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 급냉제강슬래그를 콘크리트용 잔골재로 활용하기 위한 기초적인 연구로, 급냉제강슬래그의 대체율을 달리하여 제작한 콘크리트의 특성을 평가하기 위하여 슬럼프의 경시변화, 블리딩 및 응결시험과 재령 7일, 28일 및 91일에서의 압축강도시험을 실시하였으며 그 결과를 비교 고찰하여 콘크리트용 잔골재로서 급냉제강슬래그의 활용가능성과 그 적정대체율을 규명하고자한다.

2. 시험체 제작 및 시험

2.1. 시험체 제작

2.1.1 시멘트

본 연구에서 사용한 시멘트는 D사의 보통포틀랜드시멘트(OPC)이며 화학성분 및 물리적 성질은 Table 1과 같다.

2.1.2. 골재

굵은골재는 비중이 2.64이고 최대치수는 25 mm 인 쇄석과 잔골재는 비중이 2.53인 하천사를 사용하였다.

2.1.3. 급냉제강슬래그(RCSS)

본 연구에서 이용한 급냉제강슬래그의 Free CaO는 KS L 5107 오토클레이브 팽창도시험에 의해 측정된 결과 0.15% 이하로 나타났다. 또한 비중은 3.56이고

Table 1. Chemical compositions and physical properties of cement

SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Ig. loss (%)	Specific gravity	Surface area (cm ² /g)
20.30	6.20	3.20	62.40	3.00	2.00	1.90	3.14	3,265

Table 2. Chemical compositions of RCSS

Composition (% by weight)								Free CaO (%)
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃	FeO	
12.69	2.22	26.06	40.3	7.95	0.1	0.1	3.35	below 0.15

Table 3. Physical properties of RCSS

Max. size (mm)	Specific gravity	Absorption	F.M	Unit weight (kg/m ³)	Solid volume (%)	Void volume (%)	Fine particle (%)	Soundness (%)
4~5	3.5	0.45	3.10	2.26	63.75	36.25	0.45	2.6

흡수율은 0.45%로 천연잔골재의 비중 2.53 및 흡수율 1.25%에 비해서 물성이 우수하며 실적율은 천연잔골재와 거의 같은 수준이다. 급냉제강슬래그의 화학적 성분

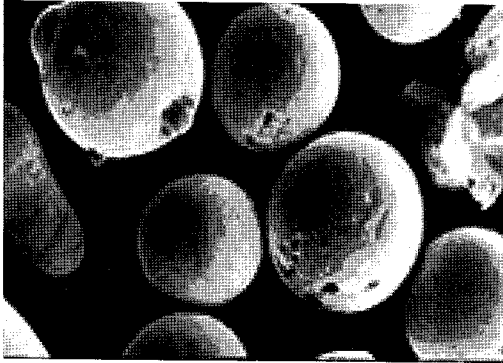
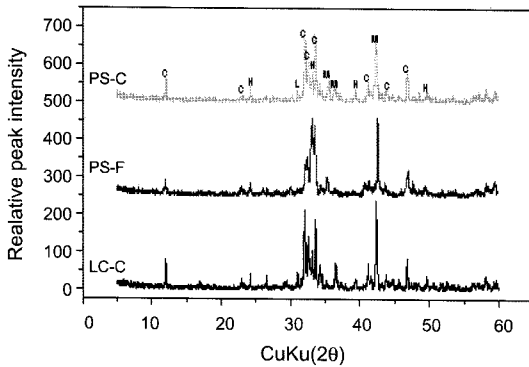


Fig. 1. Internal structure of RCSS.¹⁰⁾



여기서, PS-C : 급냉제강슬래그(굵은골재),
 PS-F : 급냉제강슬래그(잔골재)
 LC-C : 라나이트슬래그(굵은골재)
 H : Hematite(α - Fe_2O_3), M : Magnetite(Fe_3O_4),
 C : Dicalcium ferrite($2CaO \cdot Fe_2O_3$),
 L : Lamite(β - $2CaO \cdot SiO_2$)

Fig. 2. XRD analysis of RCSS.¹⁰⁾

및 물리적 성질은 각각 Table 2 및 3과 같다.

급냉제강슬래그는 제조특성 상 Fig. 1과 같이 구형의 입형을 나타내므로 혼입 시 콘크리트의 유동성 향상이 기대되며 급냉제강슬래그의 비중이 큰 것은 Table 2로부터 Fe_2O_3 의 함유량이 약 26% 정도로 일반 천연잔골재의 함유량(1.35%)에 비해 매우 많기 때문으로 판단된다.

또한 Table 2에서 급냉제강슬래그의 유리석회의 함유량이 0.15% 이하인 것은 Fig. 2로부터 CaO가 Fe_2O_3 및 SiO_2 와 반응하여 $2CaO \cdot Fe_2O_3$ 및 $2CaO \cdot SiO_2$ 의 화합물 상태인 스피넬 구조로 존재하기 때문이다.¹⁰⁾

Table 5는 폐기물공정시험법에 의한 급냉제강슬래그의 중금속 용출시험 결과를 나타내고 있는데 모든 항목이 검출되지 않는 것으로 나타나 급냉제강슬래그의 대체에 따른 환경적 문제는 발생되지 않을 것으로 판단된다.

2.1.4 배합설계

본 연구에서는 설계기준강도 50MPa, 급냉제강슬래그를 0, 15, 25, 35, 50 및 100% 대체한 콘크리트시험체를 제작하였다. 물-시멘트비 40% 및 슬럼프 15±2cm로 일정하게 유지하기 위하여 급냉제강슬래그의 대체율에 따라 나프탈렌계 고성능감수제를 사용하였으며 그

Table 5. Leaching test results of RCSS¹⁰⁾

Items	Result	Permissible range (ppm)
Pb	N.D	below 3.0
Cu	N.D	below 3.0
As	N.D	below 1.5
Hg	N.D	below 0.005 mm
Cd	N.D	below 0.3 mm
Cr	N.D	below 1.5
CN	N.D	below 1.3

N.D : 미검출

Table 4. Mixing table of concrete

Replacement ratio (%)	W/C (%)	S/a (%)	Slump (cm)	Air (%)	Unit weight (kg/m ³)					SP* (g/m ³)
					W	C	S	RCSS	G	
0	40%	43	15±2	5±1	173	433	696	0	963	64.90
15					173	433	592	147	963	51.90
25					173	433	522	245	963	34.60
35					173	433	452	343	963	21.63
50					173	433	348	490	963	12.98
100					173	433	0	979	963	0

*(주) : SP(Superplasticizer) - 고성능감수제

배합표는 Table 4와 같다.

2.2. 시험

2.2.1 슬럼프 및 공기량시험

공기량 측정은 KS F 2421(압력법에 의한 균지않은 콘크리트의 공기량시험방법)에 준하여 실시하였으며, 슬럼프 측정은 KS F 2402(콘크리트의 슬럼프시험방법)에 준하여 실시하였고, 또한 급냉제강슬래그의 대체율에 따른 슬럼프의 경시변화를 고찰하기 위하여 콘크리트 타설 후 15, 30, 45, 60, 90 및 120분에 슬럼프를 측정하였다.

2.2.2. 블리딩시험

급냉제강슬래그는 천연잔골재에 비해서 비중이 크므로 콘크리트의 강도의 증진효과는 기대되지만 재료분리의 가능성도 존재하므로 재료분리의 정량적 평가를 위해서 블리딩 측정을 KS F 2414(콘크리트 블리딩 시험방법)에 준하여 실시하였으며 블리딩율은 식(1)을 이용하여 구하였다.

$$B.R = \frac{W_b}{W} \times 100 \tag{1}$$

여기서, B.R: Bleeding rate (%)

W_b : Volume of bleeding water (cm³)

W: Volume of water in concrete (cm³)

2.2.3. 응결시험

급냉제강슬래그의 대체율에 따른 콘크리트의 응결상태를 고찰하기 위하여 KS F 2436(관입저항에 의한 콘

크리트의 응결시간 시험방법)에 의하여 콘크리트의 응결시간을 측정하였다. 콘크리트의 응결상태는 초결 및 종결시간으로 평가되며 관입저항치가 3.5MPa에 도달될 때의 시간을 초결로 28.0MPa에 도달될 때의 시간을 종결로 규정하고 있다.

2.2.4. 압축강도시험

압축강도용 시험체는 KS F 2403(콘크리트의 압축강도 시험용 시험체 제작방법)에 준하여 제작한 $\phi 100 \times 200$ mm의 원주형 시험체를 수중양생하여 재령 7일, 28일 및 91일에 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험방법)에 따라서 압축강도를 측정하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1. 슬럼프 및 공기량

Fig. 3은 물-시멘트비를 일정하게 유지한 상태에서 목표 슬럼프인 15±2cm를 얻기 위하여 사용한 고성능 AE 감수제의 첨가율을 나타낸 것으로, 급냉제강슬래그의 대체율이 증가 할수록 고성능 AE감수제의 사용량은 감소하는 것을 알 수 있었다. 급냉제강슬래그의 대체율이 100%인 경우와 천연잔골재만을 사용한 경우(대체율 0%)를 비교해보면 본 연구에서 사용된 배합의 범위에서는 고성능 AE 감수제 첨가율이 1.5% 정도 감소하였는데, 이는 급냉제강슬래그의 표면이 둥근 입형이고, 흡수율이 적기 때문에 급냉제강슬래그가 콘크리트의 유동성을 향상시킨 결과라고 판단된다.

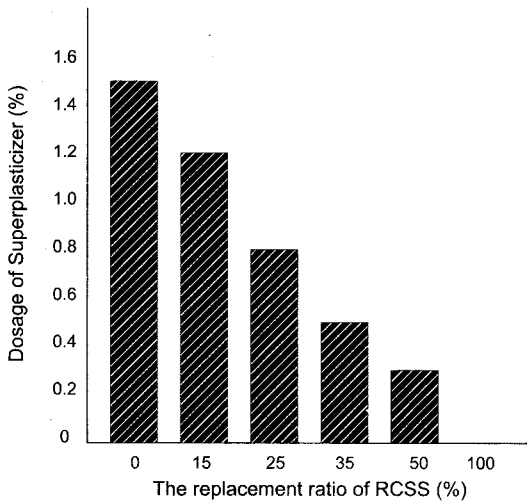


Fig. 3. Dosages of superplasticizer.

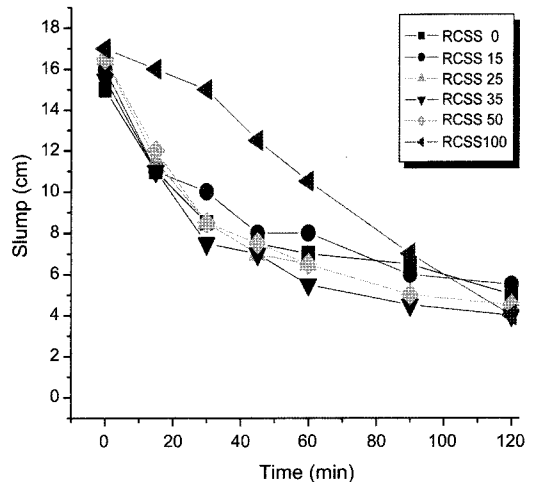


Fig. 4. Slump loss changing times.

Fig. 4는 급냉제강슬래그의 대체율에 따른 콘크리트의 슬럼프의 경시변화를 나타내고 있는데 대체율이 0~50%까지는 비슷한 경향을 보이고 있으나, 대체율이 100%인 경우 타설 초기에는 높은 유동성을 나타내고 있으나 상대적으로 경시변화 폭이 커 120분 후의 슬럼프 값은 대체율 0% 보다 오히려 낮게 나타났다. 이러한 현상은 대체율 100%인 경우 고성능AE감수제를 첨가하지 않더라도 목표슬럼프를 만족하여 고성능AE감수제를 첨가하지 않았기 때문에 나타난 결과라고 판단된다. 따라서 급냉제강슬래그의 대체율을 50% 이상 사용할 경우, 타설초기에는 유동성 문제는 없을 것으로 판단되며 타설이 지연될 경우에는 지연제 등과의 병용이 요구된다.

Fig. 5는 급냉제강슬래그의 대체율에 따른 각 시험체의 공기량 측정 결과이며, 모든 시험체가 목표 공기량인 4~6% 범위를 만족하였고, 급냉제강슬래그의 대체율에 따른 공기량 측정치는 일정한 경향을 나타내지 않고 있어 급냉제강슬래그의 대체율은 공기량에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

3.2. 블리딩율

콘크리트는 타설 중에 각 재료의 비중차에 의해서 분리가 발생되기 쉬우며 이 과정에서 내부의 잉여수가 콘크리트의 상부에 모이는 현상을 블리딩이라 한다. 블리딩은 소성수축균열 등의 초기균열을 발생시키며 특히 레이턴스를 유발하여 부착강도를 저하 시킨다. 본 연구에서 활용한 급냉제강슬래그는 기존의 천연잔골재에 비해 비중이 크기 때문에 재료분리의 가능성이 있어 블리딩율을 측정하여 평가하였다.

Fig. 6은 블리딩을 측정결과이며 급냉제강슬래그의 대체율이 커질수록 블리딩율이 증가하였으며 대체율 35%

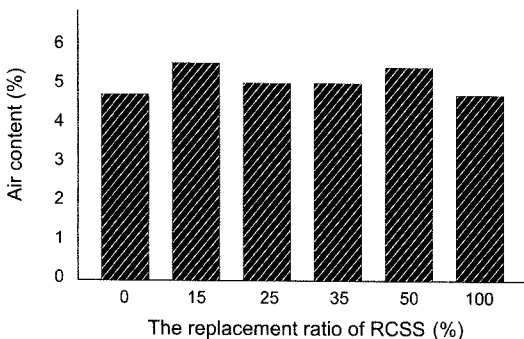


Fig. 5. Air contents of concrete by replacement ratio of RCSS.

까지는 점진적인 증가경향을 보였으나 대체율 50% 및 100%에서는 상승률이 커졌으며, 100%의 경우는 천연잔골재만을 사용한 경우에 비해 약 2배 이상 증가하였다. 이러한 현상은 급냉제강슬래그의 비중이 천연잔골재 보다 큰 것이 가장 큰 원인이고 또한 높은 슬럼프도 영향을 미친 것으로 판단되므로 단위수량을 조절하거나 입도를 조절하여 미립분의 함유량을 감소시키는 것이 요구된다.

3.3. 응결시간

급냉제강슬래그의 대체율에 따른 각 시험체의 응결시간은 Fig. 7과 같다. 이 결과로부터 급냉제강슬래그의 대체율이 증가함에 따라 응결시간이 감소되는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 목표슬럼프를 만족시키기 위하여 첨가한 고성능AE감수제의 영향 때문인 것으로 판단된다. 일반적으로 혼화제의 첨가는 응결시간을 증가시키는데 본 연구에서는 급냉제강슬래그의 대체율이 증가할수록 고성능AE감수제의 사용량이 감소되었으며, 대

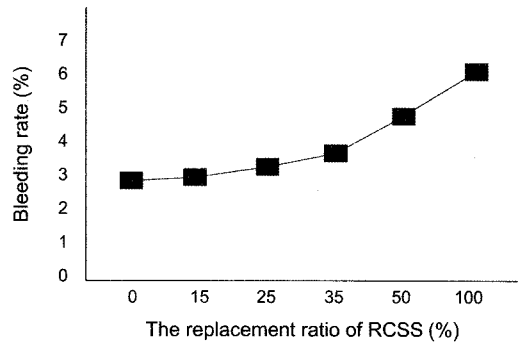


Fig. 6. Bleeding rate of concrete by replacement ratio of RCSS.

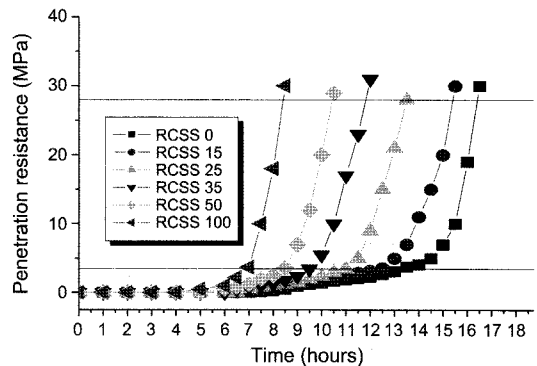


Fig. 7. Setting times of concrete by replacement ratio of RCSS.

체율 100% 에서는 전혀 사용되지 않았다. 한편, 대체율에 따라 약간의 차이는 있으나 초결시간(7~9시간) 및 종결시간(8~11시간)을 만족하는 것으로 나타나, 급냉제강슬래그의 대체는 콘크리트의 정상응결에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

3.4. 압축강도

본 연구에서는 급냉제강슬래그 대체율에 따른 압축강도를 고찰하기 위하여 재령 7일, 28일 및 91일의 압축강도를 측정하였으며, 그 결과는 Fig. 8과 같다. 각 시험체의 압축강도는 재령 및 대체율의 증가에 따라 전반적으로 증가하는 경향을 나타내었으며 특히 대체율이 50%를 초과하는 경우 강도의 증가율이 컸다. 이러한 현상은 급냉제강슬래그의 비중이 크고 입형이 매끄러운 구형이며 또한 흡수율이 낮기 때문에 나타난 결과라고 판단된다. 특히 급냉제강슬래그를 전량 잔골재로 사용한 경우에 압축강도의 증가율이 현저하게 크게 나타났으나 슬럼프의 경시변화 및 블리딩을 등을 고려할 때 급냉제강슬래그의 적정 대체율은 50% 정도로 판단된다.

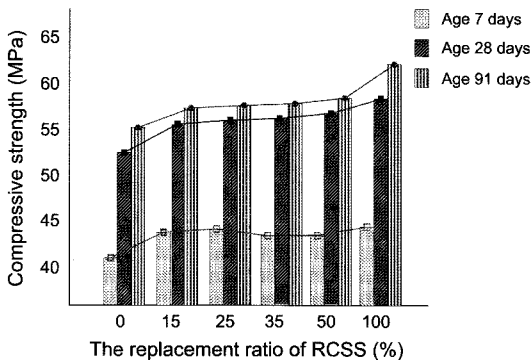


Fig. 8. Compressive strength of concrete by replacement ratio of RCSS.

4. 결 론

본 연구는 기존 제강슬래그의 단점인 유리석회의 함유량을 대폭 감소시킨 급냉제강슬래그를 콘크리트용 잔골재로 활용하기 위하여 그 대체율을 0, 15, 30, 50 및 100%로 변화시켜 제작한 콘크리트시험체의 공기량, 슬럼프의 경시변화, 블리딩을, 응결시간 및 재령에 따른 압축강도를 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 급냉제강슬래그의 대체율이 증가할수록 고성능 AE 감수제의 사용량이 감소되었으며, 급냉제강슬래그가

콘크리트의 유동성 개선에 효과적임을 알 수 있었다. 이는 급냉제강슬래그의 입형이 매끄러운 구형이고 천연잔골재보다 흡수율이 낮기 때문이라고 판단된다.

(2) 블리딩율은 급냉제강슬래그 대체율이 35% 이하에서는 천연잔골재를 사용한 경우와 큰 차이가 없었으나, 50% 이상 대체한 경우에는 블리딩율이 높아 재료 분리가 우려되므로 단위수량의 조절 혹은 입도를 조절하여 미립분의 함유량을 감소시키는 것이 필요한 것으로 판단된다.

(3) 급냉제강슬래그의 대체율이 증가할수록 응결시간이 단축되었는데 이는 급냉제강슬래그의 대체율이 증가할수록 고성능 AE 감수제의 첨가량이 감소된 결과라고 판단되며, 대체율에 따라 다소의 차이는 있지만 일반 콘크리트의 정상적인 응결시간을 만족하는 것으로 나타나 급냉제강슬래그의 대체는 콘크리트의 정상응결에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

(4) 압축강도는 재령 및 급냉제강슬래그의 대체율이 증가함에 따라 전반적으로 증가되었으며, 특히 대체율이 100%인 경우 그 증가율이 현저하게 크게 나타났다. 이러한 현상은 급냉제강슬래그의 비중이 크고 입형이 매끄러운 구형이며 또한 흡수율이 낮기 때문에 나타난 결과라고 판단된다.

(5) 이상의 결과로부터 급냉제강슬래그는 콘크리트용 잔골재로 활용할 수 있으며, 그 적정 대체율은 35~50% 정도로 판단된다.

참고문헌

1. 건설교통부, 2004 : 2003년 골재 수급현황.
2. 김무한 외, 2005 : 급냉제강슬래그 잔골재 대체율에 따른 모르타르의 유동성 및 압축강도 특성, 콘크리트 학회 논문집, 17(1), pp. 77-84.
3. 문한영 외, 2001 : 에이징 처리한 콘크리트용 제강슬래그 골재의 품질, 한국콘크리트 학회 가을 학술발표회 논문집, pp. 105-109.
4. D. G. Montgomery and G. wang, 1991 : Instant-Chilled Steel Slag aggregate in Concrete-Strength Related Properties, Cement and Concrete Research, 21, pp. 1083-1091.
5. D. G. Montgomery and G. wang, 1992 : Instant-Chilled Steel Slag aggregate in Concrete-Fracture Related Properties, Cement and Concrete Research, 22, pp.755-7601.
6. 森野奎二ほか3人, 1998 : 電酸化スラグ骨材を活用したコンクリートの諸性質コンクリート工年次論文報告集, 20(2), pp. 319-324.
7. 조성현 외, 2003 : 제강슬래그 잔골재를 사용한 모르타르

특성, 한국콘크리트학회 춘계학술발표대회 논문집, pp. 214-222.

- 8. 日本コンクリト工協九州支部各種産業廢棄物のコンクリト 用材料としての適用性する講習2000. 11, pp. 41-71.
- 9. 오옥수, 제강슬래그 내의 지금 회수방법, 특허번호 1000980620000. 1996.
- 10. (주)에코마이스터 기술자료.



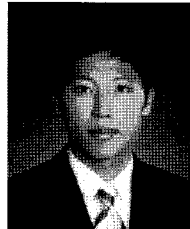
金 南 旭

- 2000. 03 일본 북해도대학 대학원 토목 공학과 공학박사
- 2000. 07~2002. 07 전북대학교 박사후 연구원 (Post Doc.)
- 2003. 03~2007. 02 신성대학 도시건설 공학과 전임강사
- 2007. 03~현재 청주대학교 이공대학 토목환경공학과 교수



裴 主 星

- 1983. 02 전북대학교 대학원 토목공학과 공학박사
- 1997. 03~1999. 03 전북대학교 공업기술 연구센터장
- 2003~2004 대한토목학회 부회장
- 1980. 08~현재 전북대학교 공과대학 토목 공학과 교수



朴 民 旭

- 2006. 02 전북대학교 공과대학 토목 공학과 공학사
- 2008. 02 전북대학교 대학원 토목공학과 공학석사
- 현재 (주)현대건설 토목부 사원