

GFRP로 보강된 순환골재콘크리트 블록의 성능평가

김용재¹, 이현기¹, 박철우², 심종성^{1*}

¹한양대학교 건설환경공학과, ²강원대학교 토목공학과

Performance Evaluation of Recycled Aggregate Concrete Block Reinforced with GFRP

Yongjae Kim¹, Hyeongi Lee¹, Cheolwoo Park² and Jongsung Sim^{1*}

¹Dept. of Civil & Environmental Engineering, Hanyang University

²Dept. of Civil Engineering, Kangwon National University

요 약 세굴방지, 하천사면보호, 하상구조물보호 등을 위해 국내에서는 프리캐스트 콘크리트 블록이 주로 사용되고 있다. 그러나 이러한 콘크리트 블록은 항상 물 또는 습윤한 환경에 접하게 되므로 내부보강재로 사용된 철근에 부식이 발생될 확률이 높으며 이로 인해 블록의 성능과 내구성이 크게 감소될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 내부보강재를 GFRP 보강근으로 대체하여 철근부식에 따른 성능저하문제를 근본적으로 해결하고자 하였으며, 콘크리트 블록에 사용되는 콘크리트에는 순환골재와 조강시멘트를 적용하여 현장적용성을 높이고자 하였다. 실험결과 조강시멘트를 사용한 순환골재콘크리트는 기존 콘크리트에 비해 작업성과 탈형강도는 유사하였으며, 재령 28일 압축강도는 약 18% 증가되었다. 하중저항성능을 측정한 결과, GFRP 보강근이 적용된 순환골재콘크리트 블록은 기존 콘크리트 블록에 비해 약 10~30%의 하중저항성능이 향상되는 것으로 측정되었다.

Abstract Precast concrete blocks are used mainly for score protection, slope protection and riverbed structure protection, etc. Because these concrete blocks are exposed to water or wetting environments, the steel rebar used as reinforcements in concrete blocks can corrode easily. Corrosion of the steel rebar tends to reduce the performance and service life of the concrete blocks. In this study, Glass Fiber Reinforced Polymer(GFRP) rebar, which does not corrode, was applied instead of a steel rebar to prevent performance degradation of the blocks. Recycled concrete aggregate and high early strength cement(HESC) were used in the concrete mix for field applicability. The experiment results showed that the workability and form removal strength of the recycled aggregate concrete using HESC showed comparable results to normal concrete and the compressive strength at 28 days increased by about 18% compared to normal concrete. The load resistance capacity of the recycled aggregate concrete blocks reinforced with a GFRP rebar increased by approximately 10~30% compared to common concrete block.

Key Words : Recycled aggregate concrete, Precast concrete block, GFRP rebar

1. 서론

최근 기후온난화에 따른 집중호우 및 강수량의 증가로 국내 홍수해 발생 가능성이 증가되었으며[1], 이와 더불어 정부에서 추진하였던 4대강 정비사업으로 인해 국

내의 하천정비사업의 마무리 공사가 지속되고 있다[2]. 현재 추진중인 하천정비사업은 하천의 사면보호 및 바닥면 침식방지, 교각 세굴방지, 제방정비 등 다양한 형태로 진행되고 있으며, 해당사업에서는 현장타설이 불리한 경우가 많고, 몰막이공법으로 인해 시공기간의 단축이 요구

본 논문은 중소기업청의 산학연공동기술개발사업(No. 000443130111)과 국토교통부·한국교통과학기술진흥원의 건설기술혁신사업 내 ‘저탄소 녹색공항공포장시공 및 유지관리기법개발-녹색공항공포장연구단’의 연구지원으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Jongsung Sim(Hanyang Univ.)

Tel: +82-31-400-5143 email: jssim@hanyang.ac.kr

Received November 7, 2013 Revised November 29, 2013 Accepted December 5, 2013

되는 경우가 빈번하므로 프리캐스트 공법으로 제작된 콘크리트 블록이 주로 사용되고 있다.

국내에서 생산되는 대부분의 콘크리트 블록 내부에는 경화후 형상유지, 운반 및 설치시 파손방지 등을 위해 일반철근이 사용되고 있으며, 시공시 제품간의 연결을 위한 연결고리에는 코팅철근이 주로 적용되고 있다.

그러나 적용되는 환경의 특성상 콘크리트 블록은 항상 물과 접하게 되며, 사계절이 존재하는 국내의 기후특성으로 인해 동결융해와 건습반복에 노출된다. 이로 인해 제품의 형상유지 및 운반·시공시 파손방지를 위해 사용되는 철근에는 운송충격, 동결융해, 건습 등에 의해 발생된 균열로 인해 타 구조물에 비해 부식이 발생할 확률이 높으며, 항상 수분에 노출되어 있으므로 빠른 속도로 부식이 진행될 수 있다.

콘크리트 블록 내부철근의 부식발생시 체적팽창으로 인해 균열과 콘크리트의 피복탈락이 발생되며 유수에 의한 모멘트, 소류력 등으로 블록의 손상은 더욱 급격히 진행될 수 있다. 파손이 진행된 블록은 유수 저항능성이 저하되며, 유수에 의한 압력이 크게 작용하는 부분은 절단되어 분리되는 현상도 발생할 우려가 있다. 이러한 손상으로 인해 하천 및 구조물 침식을 방지하는 콘크리트 블록의 주기능이 저하될 뿐만 아니라 자중감소로 인해 홍수시 유실될 가능성이 높다. 그러나 대부분의 콘크리트 블록은 하상에 위치하므로 이러한 파손이나 유실시 이에 대한 실질적인 보수가 상당히 어려운 실정이다.

그러나 국내의 관련 설계기준에서는 유수 또는 파랑에 의한 직·간접적 피해를 예방하기 위해 유수의 특성에 따른 블록의 형태, 설치면적, 중량을 주요 검토사항으로 설정하고 있으며[3], 관련 시방서에서는 블록에 사용되는 콘크리트의 압축강도와 흡수율만을 품질검토 항목으로 설정하고 있다[4]. 또한 관련 단체표준에서도 콘크리트 블록에 사용되는 콘크리트의 압축강도, 흡수율, 물-시멘트비, 투수성만을 검사항목으로 설정하고 있다[5].

국외의 경우에도 하천관련 설계기준에 블록의 명확한 품질범위는 정해져있지 않으나 일반적으로 폴리에스테르

또는 용융아연도금한 케이블로 보강된 블록을 권장하고 있다[6]. 또한 Fig. 1(a)와 같이 현장타설을 실시하는 치수사업의 경우 GFRP 보강근을 보강재로 사용한 사례가 있으며, 프리캐스트 방식으로 생산된 콘크리트 블록의 경우 Fig. 1(b)와 같이 소형화된 제품을 부식이 발생하지 않는 폴리프로필렌 재질의 케이블로 보강하여 시공한 사례가 있다.

본 연구에서는 하천정비사업에 사용되는 콘크리트 블록의 철근부식에 따른 기능상실을 예방하기 위해 현재 블록의 내부보강재로 사용되는 철근을 부식이 발생하지 않는 GFRP 보강근으로 교체하였다. 그러나 GFRP 보강근의 단가는 철근에 비해 약 2~3배 가량 높아 내부보강재만 GFRP 보강근으로 교체한 블록은 생산단가의 상승이 불가피하므로 본 연구에서는 블록의 내부보강재로 GFRP 보강근을 사용함과 동시에 순환골재, 조강시멘트, 새로운 증기양생이력을 블록의 콘크리트에 적용하여 콘크리트의 품질을 높이고 생산단가를 조절하여 현장적용성을 높이고자 하였다.

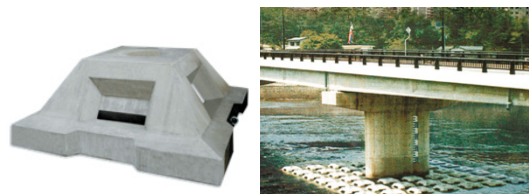
2. 실험계획 및 방법

2.1 실험개요

연구방법을 적용한 콘크리트 블록과 기존 콘크리트 블록의 성능을 비교하기 위해 현재 H사에서 일반적인 방법으로 생산중인 Fig. 2와 같은 콘크리트 블록 2종을 기준 시험체로 선정하고, 해당 블록에 대해 순환골재, 조강시멘트 및 GFRP 보강근을 적용한 콘크리트 블록을 별도로 제작하여 이를 비교시험체로 설정하였다.



(a) Rapids block



(b) Fish-hall block



(a) Pearl harbor(U.S.A) (b) Concrete fleximat(Norway)

[Fig. 1] Overseas concrete block

[Fig. 2] Shape of block and field application

재료적 측면에서 볼 때 기준시험체와 비교시험체에는 적용된 콘크리트가 다르므로 각각의 콘크리트에 대해 프리캐스트 생산현장에서 중요시되는 콘크리트의 경화전 특성(슬럼프, 공기량)과 경화후 특성(탈형강도, 재령 28일 압축강도)을 평가하였다.

구조적 측면에서 볼 때 기준시험체와 비교시험체는 내부보강재가 다르므로 이에 대한 특성을 관찰하기 위해 각 콘크리트 블록에 대해 재하실험을 실시하고 변형도를 평가하고자 하였다. 그러나 세굴방지용 콘크리트 블록은 고정하중이나 활하중이 작용하지 않는 비구조용 부재이므로 재하실험이 실시된 사례가 없으며 보강재가 블록 단면의 정중앙에 위치하므로 단면설계개념이 적용되지 않아 이에 관한 별도의 규정도 정립되어 있지 않다. 또한 세굴방지블록의 종류에 따라 형상이 매우 다양하므로 일괄적인 위치의 하중재하가 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 보다 정확한 평가를 위해 시험체로 선정된 블록과 블록군(블록과 블록이 연결되어 이루는 집합체)의 유동 해석을 통해 적절한 하중재하점과 경계조건을 설정하여 재하실험을 실시하였다.

GFRP 보강근의 건조-습윤 및 동결-융해 반복에 대한 부식저항성은 기존의 관련 연구문헌[7]에서 다양한 검토가 이루어졌으며, 성능저하율이 10% 미만인 것으로 조사되어 GFRP 보강재의 부식저항성능에 대한 검토는 본 연구의 실험에서 제외하였다.

2.2 실험변수

기준시험체에 사용된 콘크리트(CCO)의 배합에는 Table 1과 같이 현재 생산되고 있는 방식과 동일한 재료인 부순굼은골재, 부순잔골재, 보통시멘트를 사용하였으며, Fig. 3과 같이 최고온도 60℃와 최고온도 지속시간 2시간으로 증기양생하여 제작하였다.

비교시험체에 사용된 콘크리트(RRH)에는 순환굼은골재, 순환잔골재, 조강시멘트가 사용되었으며, 순환골재콘크리트는 순환굼은골재 및 순환잔골재의 치환률 증가에 따라 강도, 내구성 등이 저하되는 것으로 알려져 있으므로 비교시험체의 품질을 적정 수준으로 유지하기 위해 관련문헌조사 결과를 토대로 순환굼은골재의 치환률은 60%, 순환잔골재의 치환률은 40%로 설정하였다. 또한 최근 국내에서 생산되는 조강시멘트는 조기강도의 발현이 우수하고 과거에 비해 28일 이후의 강도발현율도 향상된 것으로 알려지고 있으므로 보통시멘트 대비 86%만 사용하고 나머지 용적 14%는 골재로 대체하였다. 증기양생 온도이력은 조강시멘트의 조기강도 발현성을 고려하여 Fig. 3과 같이 최고온도 50℃, 최고온도 지속시간 0시간으로 설정하였다.

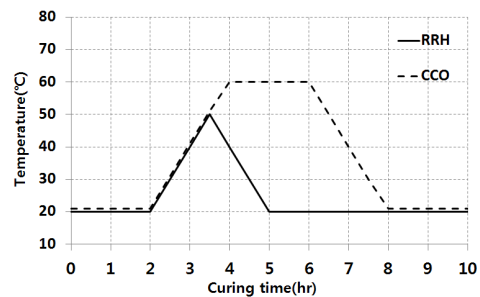
[Table 1] Variables of concrete

Specimen	Coarse aggregate	Fine aggregate	Cement	Steam curing conditions*	
				M.T.** (°C)	D.T.*** (hr)
CCO	Crushed 100%	Crushed 100%	Ordinary 100%	60	2
RRH	Recycled, 60% replaced	Recycled, 40% replaced	High early strength 86%	50	0

* Increase and decrease rate of steam curing temp. : 20℃/hr

** M.T. : Maximum Temperature

*** D.T. : During Time at maximum temperature



[Fig. 3] Steam curing conditions(RRH, CCO)

[Table 2] Variables of concrete block

Specimen	Concrete block*	Concrete	Reinforcement
R-CS	Rapids block	CCO	Steel rebar(D13)
R-RG		RRH	GFRP rebar(D13)
F-CS	Fish-hall block	CCO	Steel rebar(D13)
F-RG		RRH	GFRP rebar(D13)

* Refer to Fig. 2

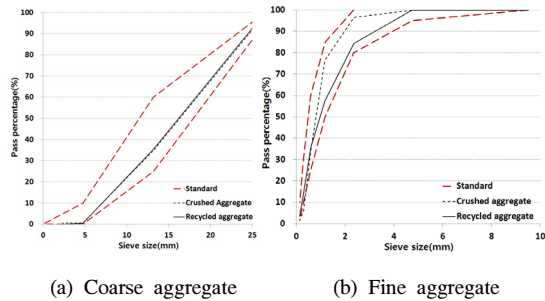
기준시험체의 보강재는 현재 생산방식과 동일한 D13 규격의 철근을 적용하였으며, 비교시험체에는 동일한 직경과 배근형상을 갖는 GFRP 보강근을 적용하였다. 상기와 같이 설정된 변수의 요약은 Table 1 및 Table 2와 같다.

2.3 콘크리트배합

CCO변수에는 충남 공주산 부순굼은골재와 부순잔골재를 사용하였으며 시멘트는 S사에서 생산되는 1종 보통시멘트를 사용하였다. RRH변수에는 국내 I사에서 생산되는 콘크리트용 순환굼은골재와 순환잔골재가 사용되었

으며, 시멘트는 S사에서 생산되는 3종 조강시멘트를 사용하였다. 감수제는 국내 D사에서 생산되는 폴리카arbon 산계 감수제를 사용하였다. 상기 나열된 사용재료에 대한 기초물성치는 다음 Fig 4, Table 3과 같다.

RRH변수의 배합설계시 순환골은골재 및 잔골재의 치환량은 Table 4와 같이 용적치환을 기준으로 산출하였으며 조강시멘트는 CCO변수의 시멘트 용적대비 86%만 사용하고 14%는 골재로 대체하였다. 배합강도는 현재 생산 중인 블록과 동일한 압축강도인 30MPa로 설정하였다.



[Fig. 4] Sieve analysis result

[Table 3] Properties of aggregate

Aggregate	Density(g/cm ³)	Absorption ratio(%)
Crushed coarse	2.69	0.91
Recycled coarse	2.54	2.16
Crushed fine	2.60	0.89
Recycled fine	2.44	5.17

[Table 4] Mix proportions

Speci-men	G _{max} (mm)	Slump (mm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	Unit mass(kg/m ³)							
						W		S		G		Ad.	
						C	R	C	R	C	R	H [*]	A ^{**}
CCO	25	150	5.0	45.7	45.6	180	393	765	0	943	0	2.91	0.02
RRH	25	150	5.0	45.7	45.6	156	342	488	305	401	569	2.53	0.02

H^{*} : High range water reducing admixture

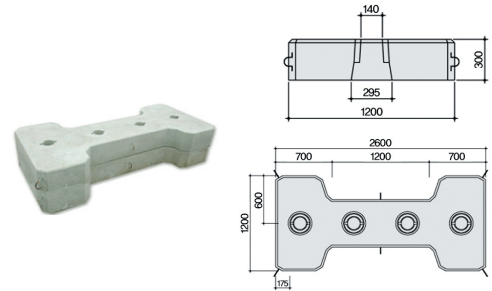
A^{**} : Air entraining agent

2.4 시험체 제작

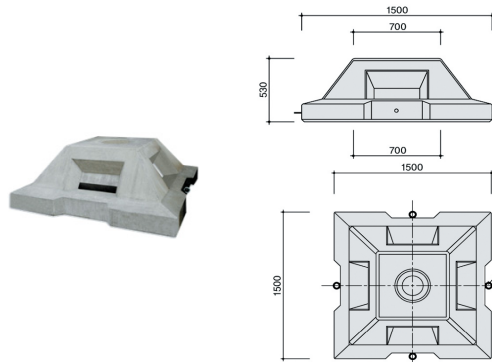
성능평가를 위해 설정된 시험체는 상기 Fig. 2 및 Table 2에 나열한 바와 같이 2가지의 블록이며, 시험체는 Fig 5. 및 Fig. 6과 같이 상용 콘크리트 블록과 동일한 크기로 제작하였다.

현장에서 사용되는 보강재(철근)는 Fig. 6(a) 및 Fig. 7(a)의 우측 사진과 같이 절단 후 간단한 용접을 통해 고정되며, Fig. 6(b) 및 Fig. 7(b)와 같이 몰드에 위치시킨후 콘크리트를 타설하였다. GFRP 보강근은 강화유리섬유와 폴리머로 구성되어 용접이 불가능하므로 본 실험에서는 부식이 발생하지 않는 스테인레스 재질의 볼트식 조임쇠 (Fig. 9)를 이용하여 Fig. 6(a) 및 Fig. 7(a)의 좌측 사진과 같이 조립하였다.

일반적으로 콘크리트 블록에 사용되는 보강재는 구조용 부재 제작시 사용되는 보강재와 달리 별도의 정착길이, 겹이음길이 또는 용접이음이 구조적 거동에 미치는 영향이 매우 작으므로 각 보강재의 연결방법에 따른 영향은 실험결과 분석시 제외하였다. 각 콘크리트 블록의 보강재로 사용된 철근과 GFRP 보강근의 물리적 특성은 Table 5와 같다.



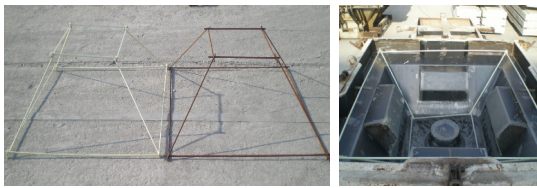
[Fig. 5] Specimen size of R-CS and R-RG (unit:mm)



[Fig. 6] Specimen size of F-CS and F-RG (unit:mm)



(a) GFRP(left) and Steel rebar(right) (b) Casting mould
[Fig. 7] Reinforcing bar and form work(R-CS, R-RG)



[Fig. 8] Reinforcing bar and form work(F-CS, F-RG)



[Fig. 9] Connector(left) and Connection Shape(right)

[Table 5] Properties of reinforcement

Reinforcement	Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (GPa)
Steel rebar	300	200
GFRP rebar	970	34

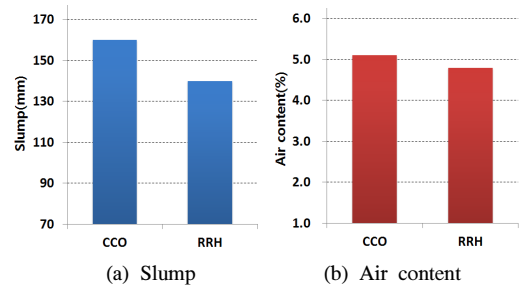
3. 실험결과

3.1 콘크리트 성능평가

굳지않은 콘크리트의 물성을 측정한 결과 Fig. 10과 같이 순환골재와 조강시멘트를 사용한 RRH 변수는 천연골재와 보통시멘트를 사용한 CCO 변수에 비해 슬럼프는 약 20mm, 공기량은 약 0.3% 감소하였다.

기존의 연구결과[8]에 따르면 순환골재는 생산시 조크러서의 물리적인 충격에 의해 채석에 비해 둥근 형태가 되며, 이로 인해 콘크리트의 슬럼프가 증가되는 것으로 알려져 있다. 또한 과거 강자갈의 채취가 가능했던 시기에 건설된 구조물을 해체하여 순환골재를 채취한 뒤 콘크리트를 배합한 경우에도 강자갈의 입형에 의해 슬럼프가 증가되는 것으로 알려져 있다. 그러나 이와 반대로 다른 연구문헌[9]에서는 순환골재는 표면의 부착모르타르에 의해 흡수율이 높으므로 골재의 함수상태에 따라 순환골재가 배합수를 흡수하는 경우 콘크리트의 슬럼프를 감소시킬 수 있는 것으로 분석되었다.

본 실험에서는 순환골재의 함수상태에 따른 실험 오차를 제거하고자 배합전 사용 순환골재에 대해 프리웨팅(Pre-wetting)을 실시하고 표면건조포화상태(S.S.D.)를 확인하였으므로 순환골재의 함수상태가 슬럼프 감소에 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

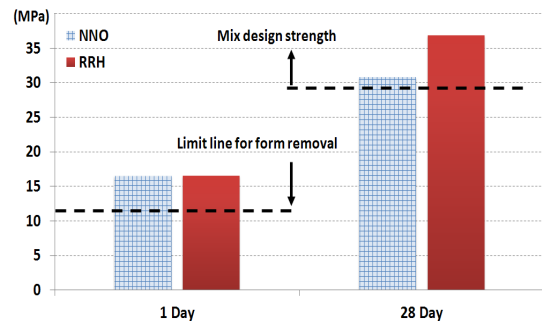


[Fig. 10] Properties of fresh concrete

다만 RRH 변수는 경제성을 높이기 위해 CCO 변수에 비해 시멘트량을 약 14% 감소시켰으며, 이로 인해 콘크리트의 슬럼프가 감소한 것으로 추정된다. 또한 본 논문에서 사용된 순환골재의 특성을 육안으로 분석한 결과 기존의 연구문헌[7]과 달리 강자갈과 채석의 비율이 약 5 : 5인 것으로 확인되었다. 이는 순환골재의 생산재료로 사용되는 폐콘크리트(모재콘크리트)가 강자갈의 채취규제가 시작된 이후에 타설되었기 때문인 것으로 추정되며, 순환골재의 모골재가 채석에 가까운 입형이므로 기존 연구문헌과 같이 입형에 의한 슬럼프 증가현상은 발생하지 않은 것으로 추정된다.

그러나 CCO변수와 비교시 RRH변수의 슬럼프 감소량은 약 20mm로 비교적 작은 수치이므로 현장작용시 콘크리트 블록의 품질, 작업성, 표면마감성에는 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다. 공기량 또한 기존 배합과 거의 유사한 수준이므로 동결융해저항성 저하 등의 내구성 문제 발생하지 않을 것으로 예상된다.

탈형시 압축강도는 콘크리트 블록의 표면품질을 결정하는 중요한 요소이나 각 블록마다 배합강도 및 사용용도가 다양하므로 이에 관한 명확한 국내기준은 아직 정립되어 있지 않다. 다만 콘크리트 블록 생산업체에서는 자체적인 품질관리를 위해 탈형시 압축강도를 약 10~12MPa로 설정하여 제품의 불량여부를 판단하고 있다.



[Fig. 11] Compressive strength

본 실험에서는 Fig. 11과 같이 CCO, RRH변수 모두 탈형강도가 약 16MPa로 측정되어 기준탈형강도를 만족하는 것으로 분석되었으며, 이는 조강시멘트의 제조시 보통시멘트에 비해 함유량이 증가된 C₃S와 높은 분말도에 의한 영향인 것으로 추정된다. 재령 28일 압축강도는 Fig. 11과 같이 RRH변수가 CCO변수에 비해 약 6MPa 높은 것으로 측정되었다. 일반적으로 증기양생의 최고온도가 높고 최고온도 대한 지속시간이 길수록 장기강도의 발현율은 저하되는 것으로 알려져 있다.

본 실험에서는 기존의 양생방법보다 증기양생 최고온도를 약 10℃ 낮추었으며, 지속시간도 2시간 감소시켰으므로 사용 시멘트량이 약 14% 감소되었음에도 불구하고 재령 28일 압축강도는 증가된 것으로 추정된다. 이는 콘크리트의 성숙도(Maturity) 이론[10]과도 부합되는 결과이며, RRH변수의 초기 콘크리트 성숙도는 CCO변수에 비해 약 63%이므로 재령의 증가에 따라 C-S-H 겔이 비교적 미세하고 균일한 형태의 경화조직을 생성할 수 있었던 것으로 판단된다.

3.2 하중저항 성능평가

3.2.1 유동해석결과

하중저항성능을 평가하기 위해서는 재하위치의 선정이 중요하나, 콘크리트 블록의 경우 보, 기둥 등과 같은 구조부재와 달리 재하위치가 명확치 않다. 또한 하상에 설치되어 일반적인 고정하중이 아닌 유수에 의한 하중과 압력을 주로 받게된다. 따라서 본 연구에서는 유동해석을 통해 하중의 재하위치를 선정하여 하중저항성능을 평가하고자 하였다.

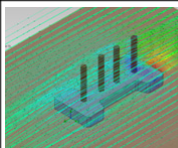
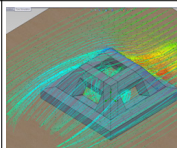
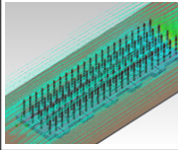
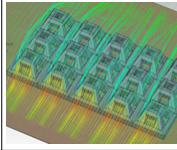
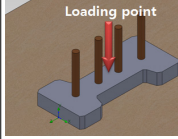
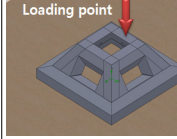
침식방지용 콘크리트 블록의 경우 터빈, 밸브 등과 같이 복잡한 형상의 기계부품에 비해 비교적 단순한 형태를 띠고 있으며, 하천수의 특성상 유체의 종류에 따른 확산 및 고압력, 점성 등을 별도로 고려하지 않아도 정확한 해석이 가능하므로 현재 주로 사용되는 Navier-Stokes equation과 난류모델을 적용하였다. 지배방정식은 난류의 time-averaged 효과를 모사하여 Favre-averaged Navier-Stokes equation을 적용하였다. 해석프로그램은 범용수치해석프로그램인 Solidworks 2013을 사용하였으며, 각 블록에 대해 단일설치된 경우와 복수설치된 경우로 구분하여 모델링하고 해석을 실시하였다. 입력조건은 다음 Table 6과 같다.

해석결과 R-CS와 R-RG 시험체는 유수에 의해 유동방향의 전면에 고압영역이 발생하며 상면은 고압영역의 소산으로 인한 저압영역이 형성되었다. 따라서 중앙부 단면 감소부분에 방부목에 의해 휨모멘트가 형성될 수 있으며 설치 및 운반시에도 자중에 의해 중앙부에 휨모멘트가

[Table 6] Conditions of CFD Analysis

Working fluid	Water(constant property)
Flow type	Steady & Incompressible
Inflow	Normal Velocity
Turbulence	k- ω model
Mesh	FVM
Velocity	5m/s

[Table 7] CFD Analysis result and Loading point

	R-CS, R-RG	F-CS, F-RG
Singular block		
Assembly block		
Loading point		

발생할 가능성이 높다. 본 실험에서는 이를 고려하기 위해 Table 7과 같이 R-CS와 R-RG 시험체의 중앙부에 집중하중을 가력하는 것으로 결정하였다. F-CS와 F-RG 시험체도 유동방향 전면에 고압영역이 형성되었으며 단면의 천공으로 인해 일부 압력이 소산되는 결과를 보이고 있으나 소산되는 압력이 크지 않으며, 압력을 받는 부분의 면적이 비교적 작으므로 해당 면에 하중을 가력하여야 할 것으로 판단되었다. 그러나 블록의 유동방향 전면은 약 60도의 각도를 갖고 있어 정확한 경사재하가 불가능하므로 이와 유사한 하중을 유발하기 위해 Table 7과 같이 상면의 모서리에 하중을 가력하는 것으로 결정하였다.

3.2.2 재하실험결과

R-CS와 R-RG 시험체의 재하실험결과, 두 시험체 모두 재하초기부터 중앙부의 콘크리트 하면에서 균열이 발생하였으며, 발생한 균열이 상부로 진전되어 Fig. 12와 같이 보의 휨파괴와 유사한 양상을 보이며 최종파괴되었다. R-CS의 최대하중 및 최대처짐은 각각 60.4kN, 2.8mm

로 측정되었으며, R-RG의 최대하중과 최대처짐은 각각 76.6kN, 3.1mm로 측정되었다.

R-CS 및 R-RG 시험체는 방부목의 삽입을 위해 Fig. 5와 같이 중앙에 직경 약 300mm의 구멍이 생성되어 있으며, 하중재하초기부터 단면적이 감소된 구멍의 하부 콘크리트에서부터 균열이 발생되기 시작하였다. 하중의 증가에 따라 R-CS 및 R-RG 시험체의 콘크리트 하면에 발생된 균열은 상부로 진전되기 시작하였으며, 변위 1.3 ~ 2.0mm(원형점선구간)에서 특이한 형태의 하중-변위곡선을 나타내었다. 이는 구멍에 의해 감소된 단면에서 시작된 균열이 점차 상부로 진전되어 단면의 중앙에 위치한 보강근까지 도달함과 동시에 보강근 아랫면 콘크리트 균열면을 개방시켰기 때문인 것으로 판단된다.

두 시험체의 전체적인 그래프의 양상을 보면 일반적인 보의 휨파괴시 측정되는 하중-변위곡선(탄성구간, 사용한 계구간, 소성구간)과 달리 철근의 휨부착 실험과 유사한 형태의 곡선을 나타내었다. 이는 일반적인 보와 달리 본 시험체는 보강재가 단면의 정중앙에 배근되었으며 원주형 구멍이 있는 단면(최소단면)에 응력이 집중되면서 보강재의 하부콘크리트에 균열이 조기에 발생하고 보강근 근처까지 진전되었기 때문인 것으로 판단된다.

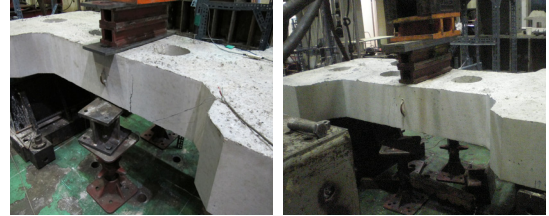
두 시험체의 최대하중과 처짐의 비교시 R-RG 시험체가 R-CS 시험체보다 높게 측정되었다. 이는 Table 5와 같이 각 시험체에 적용된 보강재의 인장강도와 탄성계수의 차에 의한 것으로 판단된다. 국외 관련 설계기준(ACI 440. 1R-01)에서도 GFRP 보강근의 이러한 특성을 반영하기 위해 GFRP로 보강된 휨 및 인장부재의 변형량 산출시 강성에 대한 감소계수를 적용하도록 하고 있다.

그러나 R-CS 시험체와 비교시 R-RG 시험체의 변위증가량은 크지 않으므로 현장적용시 이로 인한 문제는 발생하지 않을 것으로 예상된다.

F-CS와 F-RG 시험체의 재하시험결과, 초기 미세균열은 상부 가력판 바로 아래의 지점에서 형성되었으며, 이후 상부의 모서리 부분 및 하부 직사각형에서도 균열이 발생되기 시작하였다. Fig. 15와 같이 F-CS의 최대하중 및 최대처짐은 각각 336.8kN, 4.2mm로 측정되었으며, F-RG의 최대하중 및 최대처짐은 각각 380.1kN, 6.3mm로 측정되었다.

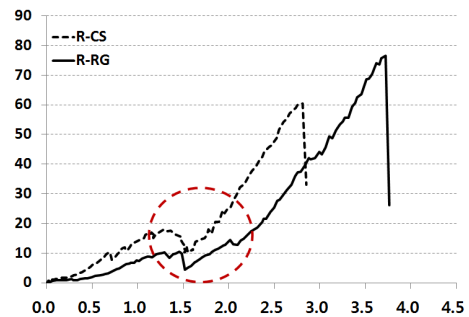
하중가력초기 두 시험체의 하중-변위 곡선은 유사한 형태로 나타났으나 재하하중 약 100kN(원형점선범위)부터 미소한 차이를 나타내기 시작하였다. 이는 상부하중에 의해 발생된 압축력이 하부의 직사각형 형태의 받침에 인장력을 유발하였으며, 각 시험체의 보강재 특성에 의해 그래프의 기울기가 다르게 나타난 것으로 추정된다. 이를 확인하기 위해 MIDAS FEA를 사용하여 하중계수 0.4에

서의 보강재 응력을 산출한 결과, Fig. 16과 같이 하부 직사각형 형태의 보강재에서 비교적 높은 응력이 형성되고 있음을 확인 할 수 있었다.

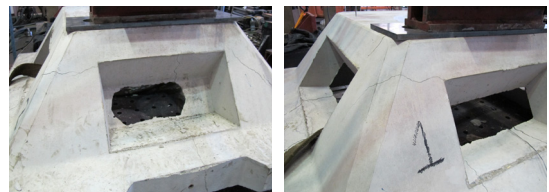


(a) R-CS (b) R-RG

[Fig. 12] Loading test result(R-CS, R-RG)

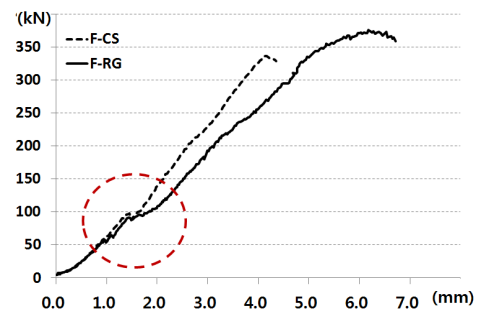


[Fig. 13] Result of load-displacement(R-CS, R-RG)

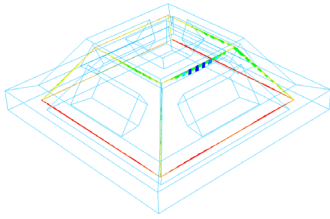


(a) F-CS (b) F-RG

[Fig. 14] Loading test result(Fish-hall blocks)



[Fig. 15] Result of load-displacement(F-CS, F-RG)



[Fig. 16] Tensile stress of reinforcement
(F-CS, F-RG : Load factor 0.40)

일반적으로 철근의 탄성계수는 GFRP 보강근에 비해 약 4~6배 높으므로 휨 및 인장력 작용시 철근을 사용한 시험체가 GFRP 보강근을 사용한 시험체보다 하중-변위 곡선의 기울기 큰 것으로 알려져 있다. 따라서 본 실험에서도 GFRP 보강근의 낮은 탄성계수와 부착강도로 인해 F-CS 시험체보다 F-RG 시험체의 변위가 더 크게 나타난 것으로 판단된다.

두 종류의 세굴방지용 콘크리트 블록의 하중저항성능 평가결과, Table 8과 같이 새로운 재료를 적용한 R-RG 시험체는 R-CS 시험체에 비해 약 26.8%, F-RG 시험체는 F-CS 시험체에 비해 약 12.9%의 하중저항성능이 증가되는 것으로 확인되었다.

[Table 8] Loading test result

	Max. Load (kN)	Max. Disp. (mm)	Increase ratio of Max. Load(%)
R-CS	60.4	2.8	26.8
R-RG	76.6	3.7	
F-CS	336.8	4.2	12.9
F-RG	380.1	6.3	

3.3 생산단가분석

각 콘크리트 블록의 제작시 사용되는 콘크리트, 보강재, 증기양생 비용을 이용하여 생산단가를 개략적으로 산출한 결과는 Table. 9와 같다. 콘크리트의 생산단가는 소요 콘크리트용적을 만들기 위해 필요한 시멘트, 굵은골재, 잔골재의 비용을 합산하여 산출하였으며, 각 재료의 운반비는 제외하고 상차시 가격을 적용하였다. 보강재도 운반비를 제외하고 소요길이에 대한 상차가격을 기준으로 산출하였다. 증기양생에 사용되는 등유비용은 Fig. 3의 증기양생이력시 소요되는 양을 산출하고 상차가격을 곱하여 계산하였다. 모든 재료의 상차가격은 대한건설협회에서 공시한 가격(2013.10)을 기준으로 하였다.

각 콘크리트 블록의 생산단가를 산출한 결과 R-RG블록은 R-CS블록 생산단가의 72%, F-RG블록은 F-CS블록 생산단가의 90%로 산출되어 기존에 비해 약 10~30%의 생산단가를 절감시킬 수 있는 것으로 확인되었다. 산출결과를 분석해보면 GFRP 보강근의 적용으로 인해 보강재의 비용은 증가되었으나 콘크리트의 배합에 사용되는 재료의 비용이 감소되었고, 증기양생시간의 단축으로 인한 등유소모량도 줄었기 때문인 것으로 판단된다.

[Table 9] Unit cost of production

	Concrete (won/EA)	Reinforcement (won/EA)	Oil (won/EA)	Unit cost (won/EA)
R-CS	21,959	2,826	21,665	46,450
R-RG	17,103	8,040	8,124	33,267
F-CS	15,787	6,861	21,665	44,313
F-RG	12,296	19,520	8,124	39,940

4. 결론

친수환경에서 콘크리트 블록의 내구성 증진을 위해 순환골재, 조강시멘트 및 GFRP 보강근을 적용하고 이에 대한 성능평가를 실시한 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- (1) 조강시멘트와 순환굵은골재 60%, 순환잔골재 40%를 치환한 콘크리트 블록의 굳지 않은 콘크리트의 특성에서 슬럼프는 일반콘크리트와 비교해 약 20mm 정도 감소하는 것으로 나타났으나 공기량은 유사하게 나타났다.
- (2) 조강시멘트와 순환굵은골재 60%, 순환잔골재 40%를 치환한 콘크리트 블록의 증기양생시 최대온도를 10℃, 지속시간을 2시간 감축시킨 결과, 탈형강도는 일반콘크리트와 유사하였으며 재령 28일 강도는 일반콘크리트 대비 약 18% 증가되었다. 이러한 현상은 조강시멘트의 높은 분말도와 C₃S함유량에 의해 조기강도의 발현이 가능하였고, 이후 열충격을 적게 받은 C-S-H겔이 비교적 균일하고 치밀한 경화조직을 생성하였기 때문인 것으로 판단된다.
- (3) 하중저항성 평가결과 GFRP 보강근이 적용된 시험체는 철근으로 보강된 시험체보다 파괴시 하중은 약 1.1~1.3배, 변위는 약 1.3~1.5배 높은 것으로 나타났으며, 이는 GFRP 보강근과 철근의 인장강도 및 탄성계수차에 기인하는 것으로 판단된다.
- (4) 친수환경에 적용되는 콘크리트 블록의 보강재를

GFRP 보강근으로 대체할 경우 현재 콘크리트 블록에서 발생하는 철근부식에 의한 성능저하문제를 해결할 수 있을 것으로 예상되며, 하천유동에 의한 압력의 저항성능도 증가 될 것으로 판단된다.

- (5) 각 콘크리트 블록의 제작에 소요되는 재료비(상차도 기준)를 이용하여 생산단가를 개략적으로 추산한 결과 조강시멘트, 순환골재, GFRP 보강근을 사용한 콘크리트 블록은 기존의 콘크리트 블록에 비해 약 10~30%가 저렴한 것으로 확인되었다.

References

- [1] G. I. Kim, *A Study on the Trends of Torrential Rainfall Events in Korea*, pp.1-5, Yonsei University, 2011.
- [2] S. J. Kim, *Problems and Improvements in Disaster Management for River*, pp.7-8, National Assembly Budget Office, 2011.
- [3] *Standard River Design Code*, pp.622-623, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2009.
- [4] *Standard Specification of River Facility Construction*, pp.44-45, Korea Water Resource Association, 2007.
- [5] *Concrete Blocks for Retaining Wall and Revetment*, pp.4-5, Federation of Korea Concrete Industry Cooperatives, 2012.
- [6] *Handbook of Scour Countermeasures Designs*, pp.93, Federal Highway Administration U.S. Department of Transportation, 2005.
- [7] *Development and Application of FRP Rebar for Agricultural Concrete Structure*, pp.139-178, Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 2005.
- [8] J. S. Sim, C. W. Park, S. J. Park and Y. J. Kim, "Characterization of Compressive Strength and Elastic Modulus of Recycled Aggregate Concrete with Respect to Replacement Ratios", *Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 26, No. 1A, pp. 214-215, 2006
- [9] K. H. Kim, M. S. Shin, Y. S. Kong and S. W. Cha, "Effect of Fly Ash on Rheology and Strength of Recycled Aggregate Concrete", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 25, No. 2, pp. 241-242, 2013
DOI: <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2013.25.2.241>
- [10] A. W. Samuel, K. S. Anton, W. B. Robert and M. N. Jeffery, *Evaluation of the maturity method to estimate concrete strength*, pp.5-7, Alabama Department of Transportation, 2006.

김 용 재(Yongjae Kim)

[정회원]



- 2005년 2월 : 한양대학교 일반대학원 건설환경공학과 (공학석사)
- 2005년 9월 ~ 2007년 3월 : 한국시설안전공단 교량팀 연구원
- 2007년 4월 ~ 2009년 8월 : 삼보기술단 기술연구소 연구원
- 2009년 9월 ~ 현재 : 한양대학교 건설환경공학과 박사과정

<관심분야>

콘크리트공학, 구조공학

이 현 기(Hyeonggi Lee)

[정회원]



- 2008년 8월 : 영남대학교 공대학 토목공학과 (공학학사)
- 2008년 9월 ~ 현재 : 한양대학교 건설환경공학과 석박사 통합과정

<관심분야>

콘크리트공학, 구조공학

박 철 우(Cheolwoo Park)

[정회원]



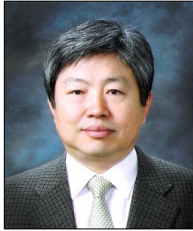
- 2000년 10월 : University of Illinois at Urbana-Champaign (공학박사)
- 2001년 10월 ~ 2003년 8월 : 미국 캘리포니아주 도로교통국 하부구조팀장
- 2006년 8월 ~ 현재 : 강원대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

콘크리트공학, 구조공학

심 종 성(Jongsung Sim)

[정회원]



- 1987년 6월 : Michigan State University (공학박사)
- 2011년 1월 ~ 2012년 12월 : 한국콘크리트학회 회장
- 2013년 1월 ~ 2013년 12월 : 대한토목학회 회장
- 1987년 9월 ~ 현재 : 한양대학교 건설환경공학과 교수

<관심분야>

콘크리트공학, 구조공학