



수중 구조물의 보수·보강을 위한 수중 접착제, 에폭시와 섬유복합재의 개발

김성배¹⁾ · 이나현¹⁾ · 남진원¹⁾ · 변근주¹⁾ · 김장호^{1)*}

¹⁾연세대학교 사회환경시스템공학부

Development of Underwater Adhesive, Epoxy, and FRP Composite for Repair and Strengthening of Underwater Structure

Sung-Bae Kim,¹⁾ Na-Hyun Yi,¹⁾ Jin-Won Nam,¹⁾ Keun-Joo Byun,¹⁾ and Jang-Ho Jay Kim^{1)*}

¹⁾Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

ABSTRACT Recently, numerous construction techniques for repairing and strengthening methods for above ground or air exposed concrete structure have been developed. However repairing and strengthening methods for underwater structural members under continuous loading, such as piers and steel piles need the further development. Therefore, this study develops an aqua epoxy, which can be used for repairing and strengthening of structural members located underwater. Moreover, using the epoxy material and strengthening fibers, a fiber reinforced composite sheet called Aqua Advanced FRP (AAF) for underwater usage is developed. To verify and to obtain properties of the material and the performance of AAF, several tests such as pull-off strength test, bond shear strength test, and chemical resistance test, were carried out. The results showed that the developed aqua epoxy does not easily dissolve in wet conditions and does not create any residual particle during hardening. In spite of underwater conditions, it showed the superior workability, because of the high viscosity over 30,000 cps and adhesion capacity over 2 MPa, which are nearly equivalent to those used in dry conditions. In case of the chemical resistance test, the developed aqua epoxy and composite showed the weight change of about 0.5~1.0%, which verifies the superior chemical resistance.

Keywords : repair and strengthening, aqua epoxy, aqua advanced FRP (AAF), workability, adhesion capacity

1. 서 론

최근 육상 구조물의 성능을 향상시키기 위한 공법중 가장 널리 사용되는 공법은 섬유복합재를 사용한 외부부착 공법이다. 이미 FRP로 보강된 구조물의 성능향상에 대한 연구는 많은 연구자들^{1,2)}에 의해 구명되었고, 건설재료로서의 활용성도 검증되었다.³⁾

FRP는 수중 환경이나 습윤 환경 하에서도 충분한 안전성과 내구성을 발휘하는 재료이며, 높은 절연성과 피로 저항성을 유지하고 콘크리트의 연성증진에 있어 타재료에 비해 우수하며 습윤 또는 수중 환경에서 콘크리트 부식을 방지하는 기능을 갖는다.^{4,6)}

이러한 장점에도 불구하고 수중 또는 습윤 상태에 있는 구조물의 보수·보강에 사용하기는 쉽지 않다. 수중 또는 습윤 상태에서 부착력을 지니는 에폭시 접착제들은 고가이고 시공성과 접착강도면에서 수중 콘크리트 구조물의 보수·보강에 적용하기에는 부족한 점들이 많기 때

문이다.⁷⁾ 특히 수중구조물의 보수·보강을 위해서는 손상부위에 대하여 건조 상태를 유지해야만 효과적인 보수·보강 효과를 얻을 수 있어 수중의 부분적인 결함에 대하여 물막이 시설 등을 설치해야 하는데, 이 공사를 수행하는 것은 엄청난 공사기간과 인력, 중장비가 동원되므로 시간과 경제적 손실이 크다.⁸⁾ 이러한 필요성에 따라 습윤 또는 수중 하에서의 보수·보강 공법들에 대한 연구가 진행되고 현장적용을 통해 시공 시 발생하는 문제점을 파악하여 지속적으로 공법개선에 노력을 기울여 왔다.⁹⁻¹¹⁾ 하지만 수중용 에폭시에 대한 연구는 많지 않은 실정이다.

습윤 환경 또는 수중 환경에 사용되는 고성능 접착제는 수중에서 콘크리트 면과 유리섬유 또는 탄소섬유 사이에서 우수한 부착강도를 유지할 수 있어야 하며, 수중이라는 제약조건 속에서도 작업성이 우수하여야 한다. 또한 도포시 수중에서 물에 풀리거나 부유물질이 발생하지 않아야 하며 재질 자체가 친환경적이어야 한다. 따라서 이 연구에서는 수중환경에 적용이 가능한 고성능 수중 경화형 에폭시를 개발하고, 개발된 수중 경화형 에폭시의 다양한 성능실험을 통해 습윤 또는 수중 환경에 위치하고 있는 콘크리트 구조물의 적용성을 평가하였다.

*Corresponding author E-mail : jhkim@yonsei.ac.kr

Received June 26, 2009, Revised January 14, 2010,

Accepted January 19, 2010

©2010 by Korea Concrete Institute

2. 수중용 고성능 접착제(aqua primer adhesive, APA)와 수중 함침용 고성능 에폭시(aqua impregnation epoxy, AIE)의 개발

복합섬유와 고분자 매트릭스 간의 계면특성은 복합재료의 최종성능을 결정하는데 있어 매우 중요한 역할을 한다. 특히 그 중에서 계면전단강도는 섬유강화 복합재료의 특수 환경에 대한 기계적 성질과 내구성을 평가하는 가장 기초적인 요소의 하나이다.¹²⁾ 만약 섬유강화복합재료의 계면전단강도가 매우 낮다면, 그것의 기계적 성질은 주로 낮은 계면강도에 의해 좌우된다. 그러므로 고성능의 복합섬유를 사용하더라도 섬유의 성능이 복합재료에 충분히 반영된다고 보기는 어렵다.¹³⁾ 그러므로 습윤 및 수중환경 하에 위치하고 있는 교량이나 항만시설 등과 같은 콘크리트 구조물을 유리섬유나 탄소섬유 등으로 보수·보강하기 위해서는 습윤 및 수중환경에 적용 가능한 고성능 에폭시가 필요하다.¹⁴⁻¹⁶⁾

2.1 성분 및 조성

수중환경에서 콘크리트와 유리섬유 또는 탄소섬유 등의 부착성능을 높이기 위하여 주제의 조성물은 A형과 F형의 혼합물을 사용하였고, 여기에 부착강도를 증진시키기 위하여 쉘라계 커플링제인 에폭시 쉘라(epoxy silane)를 도입하였다. 또한, 작업성이 용이하도록 적절한 점도를 유지시켜 주기 위하여 이관능성 에폭시인 반응성 희석제(difunctional reactive diluent)를 첨가하였다.

경화제에는 수중에서의 접착성능을 향상시키기 위하여 변성지방족 아민(modified aliphatic amine)과 아미도 아민(amido-amine)의 혼합물을 사용하고 폴리아미드형 아민(polyamid-amine)을 도입하여 수중에서의 경화성능을 향상시켰으며, 노닐페놀계 유화제(nonylphenol dispersing agent)를 첨가하여 유동성을 부여함으로써 작업성능을 향상시켰다. 이와 같이 제조된 조성물인 수중경화형 에폭시의 경화반응은 다양하게 진행되며, 수중경화형 에폭시의 대략적인 화학구조를 도시하면 Fig. 1과 같다.

수중경화형 에폭시 주제의 주성분인 에폭시 쉘라는 아민계 경화제와 반응하여 경화체를 형성한다. 또한 에폭시 쉘라에 함유된 메톡시 관능기(-O-CH₃)는 쉘라 커플링 경화반응을 유도하여 콘크리트 모체와 결합을 하거나 섬유와 결합을 이루며 자체적으로도 경화반응이 진행되어 콘크리트와의 결합력을 증대시킬 뿐만 아니라 내산성 및 내화학성 내약품성 등을 증진시키는 역할을 수행한다. 수중경화형 에폭시와 콘크리트 구조물의 보강을 위하여 사용되는 유리섬유와의 반응 메커니즘은 Fig. 2와 같다.

수중경화형 에폭시는 Table 1과 같은 성분조성을 지니고 있으며, 이들 성분조성을 변화시켜 수중에서 콘크리트 면과 유리섬유복합재 또는 탄소섬유복합재와 우수한 부착강도를 유지하며 작업성이 우수하고 도포 시 물에 풀리거나 부유물질이 발생하지 않으며 친환경적인 조성

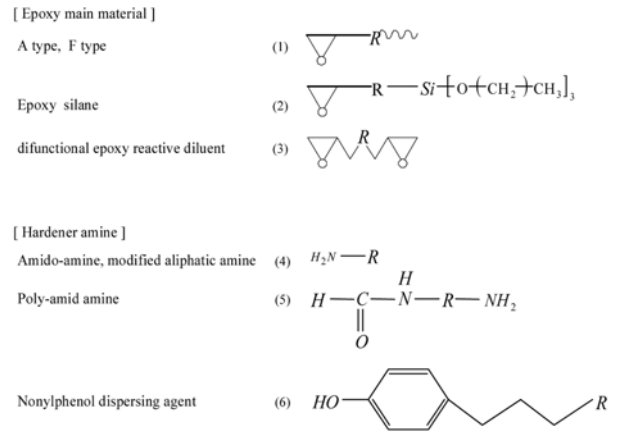


Fig. 1 Chemical structure of aqua epoxy

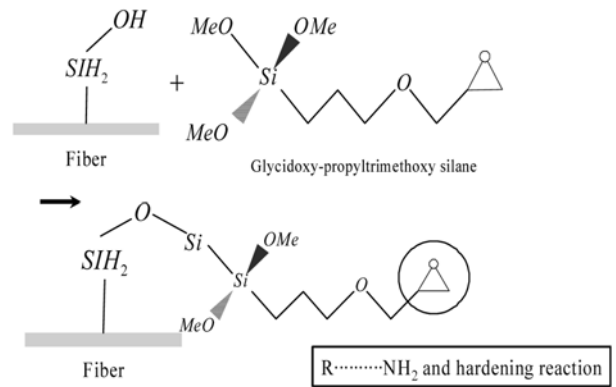


Fig. 2 Reaction mechanism between underwater hardening epoxy and glass fiber

물인 수중용 고성능 접착제 APA와 수중 함침용도인 AIE로 세분화시켜 개발하였다.

2.2 최적배합비의 도출

이 연구에서는 주제와 경화제의 구성성분의 조성비를 변화시켜 가면서 최적의 배합비를 찾는 방식을 취하였다. 1단계로 수중에서의 부착력을 향상시키기 위하여 일반적인 에폭시 조성물은 수중에서의 부착강도가 낮으므로 수중에서 콘크리트면과 부착성능을 지니고 있고 에폭시와도 반응성을 가지고 있는 에폭시 쉘라 커플링제의 적절한 함량을 찾고자 하였다. 이때 경화제의 특성에 따라 그 물성값이 달라질 수가 있으므로 가장 많은 물성값이 알려지고 그 구성이 단순한 트리에틸테트라아민(triethylenetetramine)을 경화제로 사용하여 단순하게 쉘라계 커플링제의 함량에 따른 물성의 변화를 측정함으로써 첨가될 쉘라계 커플링제인 에폭시 쉘라의 첨가량을 알고자 하였다. 에폭시 주제에 대하여 쉘라계 커플링제인 에폭시 쉘라의 함량을 각각 0, 5, 10, 15 phr(hundred per ratio)로 증가시켜 가면서 수중에서 도포한 후 7일간 침지시킨 후에 꺼내어 부착강도 값을 측정하였다. 측정 결과 쉘라커플링제인 A-150의 함량이 10 phr에서 가장 높은 부착강도가 발현됨을 알 수 있었다.

Table 1 Composite of underwater epoxy base resin and hardener

Specimen	Component	Weight	Role
Underwater epoxy base resin	A type	40~49	high polymer hardened formation
	F type	4~13	adhesion increase in moist condition
	Epoxy silane	3~4	coupling agent/strength increase/combination with glass fiber
	Difunctional reactive diluent	3~4	viscosity control/strength increase
	Organic filler	12~38	strength increase
Underwater epoxy hardener	Amido-amine	1~4	hardening reaction inducement/adhesive strength increase
	Modified aliphatic amine	1~6	hardening reaction inducement/adhesive strength increase
	Polyamid-amine	7~10	cold cure reaction inducement
	Nonylphenol dispersing agent	0.1~1	dispersion function/viscosity control

1단계의 실험값을 통하여 썰란계 커플링제가 수중에서 부착력을 증진시킴을 알 수 있었고 첨가량이 늘어날수록 부착강도가 높게 나옴을 알 수 있었다. 그러나 썰란계 커플링제의 함량이 10 phr을 넘으면 오히려 부착강도가 감소하는 것으로 나타났다. 이는 실란 커플링제가 아민계 경화제와 100% 반응하지 않고 유리된 상태로 존재하여 매트릭스의 물성이 저하된 것으로 사료된다. 따라서, 10 phr 이상의 썰란 커플링제가 혼입되면 과도한 양의 혼입으로 경화제와 결합되고 남은 반응물이 복합체 내에서 영향을 미쳐 오히려 부착력이 감소된다. 2단계는 수중경화형 에폭시 주재와 경화제의 함량을 고정하고 썰란계 커플링제인 에폭시썰란인 A-150의 함량을 변화시켜 가면서 수중에서의 부착강도를 측정하였다. 1단계와 마찬가지로 썰란커플링제의 함량이 10 phr일 때 가장 높은 부착강도가 나타남을 알 수 있었다. 3단계는 수중용 고성능 접착제의 경우 수중에서 콘크리트면에 직접도포되는 경우이므로 물속에서 풀리거나 흘러내리면 안된다. 따라서 적절하게 점도를 유지하여야 하고 작업자가 수중에서도 도포시 힘들지 않도록 재질 자체가 부드럽게 발리는 특성인 요변성(thixotropy)을 가져야 한다. 이러한 특성을 주기 위하여 Hydrocellulose계 증점제인 CM3를 선정하였다. 증점제의 함량을 증가시켜 가면서 부착강도와 상관계와 수중에서의 작업성을 평가한 결과, 증점제의 함량이 0.3 phr을 혼합하였을 때 물성의 손실 없이 수중에서의 가장 적절한 작업 점도인 35,000~40,000 cps의 점도를 나타내었다. 마지막 4단계로는 경화제 부분에 썰란계 커플링제를 도입하여 이를 3단계까지 구성된 에폭시 주재와 혼화하여 최종물성을 확인하는 실험을 진행하였다. 경화제는 아민 성분으로 구성되어 주재에 사용하였던 에폭시 썰란을 도입할 경우 경화반응이 진행되어 사용할 수가 없으므로 경화제에는 한쪽의 관능기는 아민을 가지고 있고, 다른 한쪽의 관능기는 에폭시 관능기를 가진 아미노썰란인 A-530 커플링제로 선택하였다. 아미노 썰란 커플링제의 함량을 0, 3, 5, 10 phr로 그 함량을 증가시켜가면서 부착강도를 확인한 결과 Table 2에 나타난 것과 같이 5 phr일 때 그 값이 가장 높게 나타났다.

Table 2에서 알 수 있듯이 각각의 개선 단계별로 최적의 조성비를 도출하고, 점도, 평균부착강도의 증진을 위

하여 추가적인 첨가제를 혼합함으로써 우수한 부착강도를 갖으며, 수중 시공성 확보를 위하여 점도를 10,000 cps 이상 확보하여 Fig. 3과 같이 수중에서도 콘크리트 및 강재 표면에 효과적으로 흘날림 없이 시공이 가능하여 효율적인 섬유복합체의 접착이 가능하도록 하였다. 이 연구에서 수중에서 시공이 가능한 소정의 점도를 가지면서 우수한 부착강도를 갖는 4단계 Case 3의 조성비를 적용한 수중용 고성능 에폭시 조성물이 개발되었다. Fig. 3은 수중에서 도포된 수중 접착제이며, Fig. 4는 수중 함침용 에폭시와 수중에서의 복합체의 시공 장면이다.

3. 수중용 고성능 접착제와 수중 함침용 고성능 에폭시의 성능시험

이 연구에서는 복합재료의 역학적, 화학적 특성을 평가하기 위해 기초물성시험을 수행하였다. 복합재료는 함침제로 사용하는 에폭시와 보강섬유로 구성되어 있으므로 각각에 대한 성능을 평가하도록 하고, 실험에서 평가되는 실험값을 기초로 설계 및 시공에 반영되는 설계정수를 확립하도록 한다. 수중용 고성능 AAF 복합체는 함침되는 섬유에 따라, 유리섬유를 사용할 경우는 AAF-G로, 탄소섬유를 사용할 경우는 AAF-C로 나타내었다.

3.1 압축강도 시험

이 연구에서 사용되는 수중용 고성능 접착제(APA)는 수중에서도 분리되지 않는 특수형으로 구조물과 복합재료 사이의 접착제로 사용되며, 수중 함침용 고성능 에폭시(AIE)는 보강섬유를 함침시키는데 사용되므로 2가지 에폭시를 모두 시험하도록 한다. 보강섬유 복합체를 함침시키기 위한 결합재(matrix)로 사용되는 에폭시 수지에 대한 압축강도시험은 KS M 3015에 따라 높이 25.4 mm, 너비 12.7 mm, 두께 12.7 mm의 각주형 시편을 제작하여 시험하였다. 시험체의 개수는 각각 18개로 하였으며, 그 결과를 Table 3에 나타내었다.

파괴형태는 쪼갬인장 파괴형태를 나타내고 있었으며, 기존의 에폭시보다는 강성이 있음을 확인하였다. 개발된 수중 함침용 고성능 에폭시 및 수중용 고성능 접착제의

Table 2 Optimum mix proportion determination

Step	Component	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
1	Underwater hardening epoxy base resin A	100	100	100	100
	Hardener (triethylenetetramine)	13.5	13.5	13.5	13.5
	A-150 additive epoxy silane (base resin mixture)	0	5	10	15
	Viscosity (CPS)	5,400	5,000	4,200	3,300
	Average adhesive strength in underwater (MPa)	5	5.48	10.38	6.54
	First setting time (min)	15	17	20	25
	Workability in underwater	poor	poor	poor	poor
2	Underwater hardening epoxy base resin A	100	100	100	100
	Underwater hardening epoxy base resin B	35	35	35	35
	A-150 additive epoxy silane (base resin mixture)	0	5	10	15
	Viscosity (CPS)	8,500	8,000	7,000	5,800
	Average adhesive strength in underwater (MPa)	15.92	19.02	22.46	19.92
	First setting time (min)	30	35	40	45
	Workability in underwater	poor	poor	poor	poor
3	Underwater hardening epoxy base resin A	100	100	100	100
	Underwater hardening epoxy base resin B	13.5	13.5	13.5	13.5
	S-510 additive epoxy silane (base resin mixture)	10	10	10	10
	Thickener (CM3)	0.1	0.2	0.3	0.4
	Viscosity (CPS)	8,400	23,500	38,500	45,800
	Average adhesive strength in underwater (MPa)	21.72	21.94	22.36	21.76
	First setting time (min)	40	40	40	40
4	Workability in underwater	poor	good	good	good
	Underwater hardening epoxy base resin A	100	100	100	100
	Underwater hardening epoxy base resin B	35	35	35	35
	S-510 additive epoxy silane (base resin mixture)	10	10	10	10
	Thickener (CM3)	0.3	0.3	0.3	0.3
	A-530 additive amino silane (hardener mixture)	0	3	5	10
	Viscosity (CPS)	38,500	36,000	33,000	28,400
Average adhesive strength in underwater (MPa)	22.36	23.24	26.12	24.22	
First setting time (min)	40	42	45	50	
Workability in underwater	good	good	good	good	

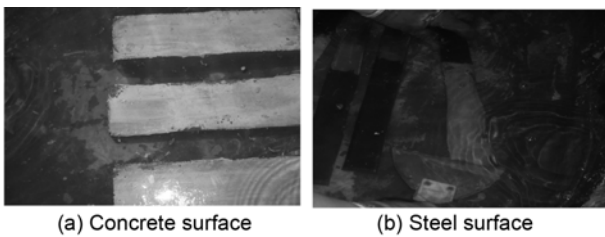


Fig. 3 Spreading of aqua adhesive in underwater

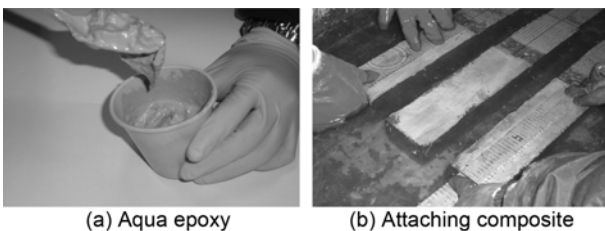


Fig. 4 Application of composite in underwater

평균압축강도는 각각 89.7 MPa과 79.4 MPa로 일반적으로 육상과 수중에서 요구되는 에폭시의 압축강도 50 MPa

보다 높게 나타났다. 그러나 이 연구에서는 안전율을 도입하여 Table 3과 같이 수중용 접착제와 함침용 에폭시의 압축강도를 60 MPa과 70 MPa로 적용하도록 하였다.

3.2 인장전단 부착강도 시험

인장전단 부착강도 시험은 접착면에서의 전단응력을 평가하는 것으로 KS M 3734에 따라 시험하였다. Fig. 5는 수중용 고성능 복합재(aqua advanced FRP, AAF)의 인장전단 부착강도 시험편의 모양 및 치수를 나타내고 있다.

수중용 고성능 AAF 복합재를 수중용 고성능 접착제로 부착한 후 시험기의 그림 중앙에 수직이 되도록 고정하고 시험편이 파괴될 때까지의 최대하중을 기록하였다. 실험에서 얻어진 최대하중을 접착면적으로 나누어 각각의 시험시편에 대한 수중용 고성능 에폭시의 인장전단 부착강도를 구하면 Table 4와 같다.

3.3 부착강도시험(pull off test)

수중용 고성능 AAF 복합재와 콘크리트 사이의 부착강

Table 3 Compression test result of APA and AIE

Specimen	Number	Min. value (MPa)	Max. value (MPa)	Avg. compressive strength (MPa)	Coefficient of variation (%)	Recommended value (MPa)
APA	18EA	64.4	86.7	79.4	7.1	60
AIE	18EA	79.4	100.8	89.7	7.4	70

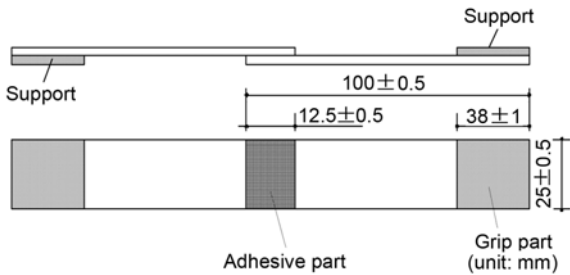


Fig. 5 Typical geometry of specimens used in tensile-shear bond tests

도는 ASTM D 4541에 따라 시험하였다. 이 연구에서는 피부착면의 특성을 파악하기 위해 고강도 콘크리트 및 보통강도 콘크리트를 대상으로 실험을 수행하였고, 수중 함침용 고성능 에폭시(AIE) 및 수중용 고성능 접착제(APA)에 대하여 동일한 시험을 모두 수행하였으며, 부착강도시험은 APA를 사용하여 콘크리트에 부착한 후 대기 양생 후 실시하였다. 부착강도 시험전경은 Fig. 6에 나타내었으며, 시험 결과는 Table 5와 같다.

Pull-off test를 통해서 도출된 결과는 기존의 연구에 비해서 향상된 부착성을 보이고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 최소사용기준이 0.7 MPa이고 2.0 MPa 이상의 부착강도를 가지면 우수하다고 평가할 수 있다. Fig. 7에서와 같이 피부착면이 건조한 상태에서 실험이 진행된 이 시험 결과는 기존 국내의 육상용 에폭시의 부착강도와 유사하거나 다소 높은 부착강도를 가지고 있는 것으로 나타났다. 한편, 수중 또는 습윤상태에서 부착강도를 측정한다면 현재 시험 결과보다 다소 낮은 강도로 평가될 것으로 판단하여 부착강도를 1.0 MPa로 추천하였다.

수중용 고성능 AAF 복합재는 습윤 및 수중환경 구조물의 보수·보강을 위한 것으로 습윤 및 수중상태에서

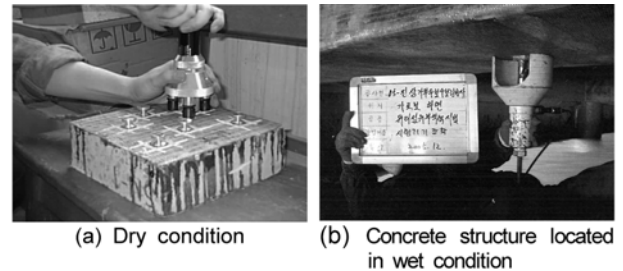


Fig. 6 Photo of pull-off strength test

의 부착강도를 측정하기 위해서 실구조물에 적용하여 부착강도를 측정하였으며, Fig. 6(b)는 해안가에 위치한 부두 하부에서 부착강도를 측정하는 장면이다. 수중에서 부착강도의 측정은 수중에서 장비를 운용할 수 없기 때문에 사실상 불가능하므로, 조수간만의 차를 이용하여 다양한 현장조건에서 양생 및 거치한 후 일정한 시간이 경과한 뒤에 부착강도를 측정하였다. 실험 결과는 Table 6에 나타내었다. 부착 실험 결과, 섬유의 부착강도 값은 건조한 조건에서 4.0 MPa 이상, 습윤 및 수중조건에서 2.0 MPa 이상으로 측정되어 습윤 및 수중조건에서도 우수한 부착성을 갖는 것으로 평가되었다.

3.4 내화학적 시험

이 실험은 수중용 고성능 접착제와 수중 함침용 고성능 에폭시에 대하여 KS M 3007에 따라 실험을 실시하였다. 황산 10%, 염산 10%, 수산화나트륨 10%, 염화나트륨 10%의 용액에 정사각형으로 제작된 시편을 각각 5개씩 침지시켜 5주 동안 각 시편의 중량변화와 변질상태를 관찰하였다. APA의 실험 결과는 Fig. 8(a)와 같고,

Table 4 Test result of tensile-shear bond strength

No.	Adhesion length (mm)	Adhesion width (mm)	Area (cm ²)	Load (N)	Tensile-shear bond strength (MPa)	Remark
1	12.56	24.55	3.08	3,750	12.16	Central portion failed
2	12.58	24.32	3.05	3,550	11.60	
3	12.55	23.55	2.95	3,200	10.82	
4	12.55	24.58	3.08	3,650	11.83	
5	12.60	24.58	3.09	3,750	12.10	
Minimum value (MPa)					10.82	
Maximum value (MPa)					12.16	
Average value (MPa)					11.6	
Coefficient of variation (%)					4.2	
Recommended value (MPa)					10.0	

Table 5 Bond strength of AIE and APA

Surface for adhesion	High strength concrete (over 30 MPa)				Normal strength concrete (less than 30 MPa)			
Adhesives	APA		AIE		APA		AIE	
Test classification	Weight (N)	Bond strength (MPa)	Weight (N)	Bond strength (MPa)	Weight (N)	Bond strength (MPa)	Weight (N)	Bond strength (MPa)
P-1	10,380	3.729	13,940	4.740	8,040	2.734	8,540	3.074
P-2	9,810	3.335	11,020	3.745	6,170	2.168	9,760	3.512
P-3	8,710	2.484	9,070	2.828	6,790	2.309	9,000	3.238
P-4	9,385	3.391	15,500	5.270	7,510	2.552	7,590	2.534
Minimum value (MPa)	2.484		2.828		2.168		2.534	
Maximum value (MPa)	3.729		5.270		2.734		3.512	
Average value (MPa)	3.235		4.146		2.440		3.090	
Coefficient of variation (%)	14.5		26.1		10.3		13.3	
Recommended value (MPa)	2.0		2.0~2.5		2.0		2.0~2.5	

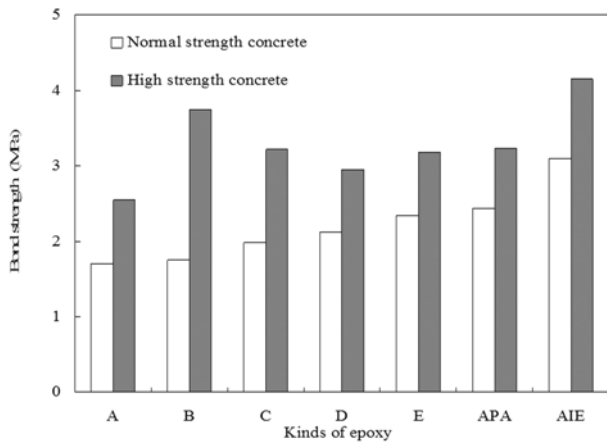


Fig. 7 Adhesive strength comparison to epoxies used in Korea

Table 6 Bond strength in concrete structure

Locations	Bond strength (MPa)	Failure mode
Dry condition	4.22	Matrix failure
Wet condition	3.94	Interface failure
Underwater	2.25	Interface failure

AIE의 실험 결과는 Fig. 8(b)와 같다. 시험 결과에서 침지기간의 증가에 따른 화합물의 형성으로 질량변화가 나타났으며, 황산 10% 및 염산 10%에 노출된 시편들은 변색 및 변형이 발생하므로 직접적으로 산에 노출될 때는 세심한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

4. 수중용 고성능 AAF 복합재의 성능실험

4.1 수중용 고성능 AAF 복합재의 압축강도시험

수중용 고성능 AAF 복합재의 압축강도를 측정하기 위한 시편은 KS M 3015에 따라 높이 25 mm, 너비 13 mm, 두께 13 mm의 각주형 시편을 섬유방향과 직각인 방향으로 하중을 가하는 시편과 섬유방향과 평행한 방향으로 하중을 가하는 시편으로 나누어 제작하였다. 압축강도 시험은 만능시험기를 이용하였으며, 하중 재하속도는 200

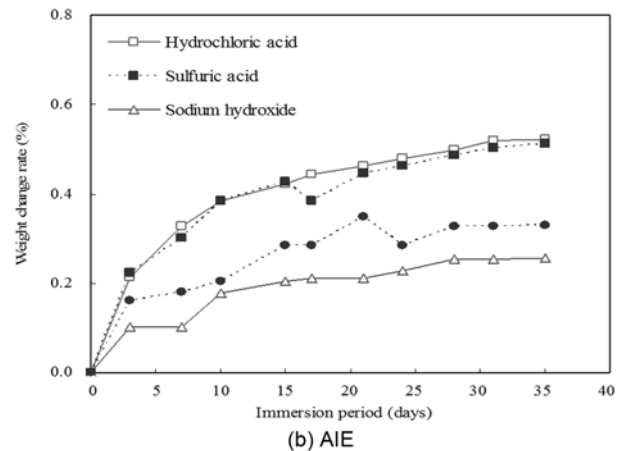
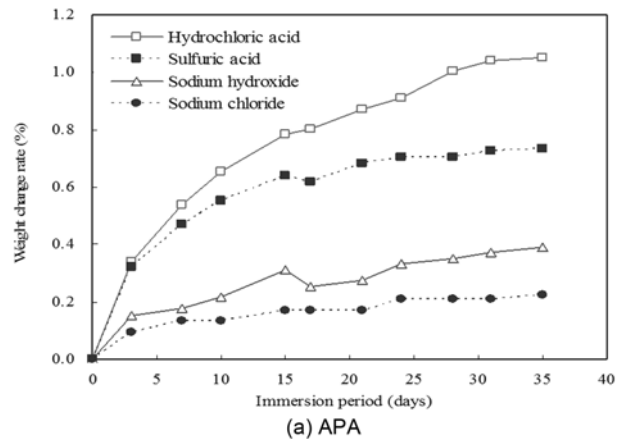


Fig. 8 Comparison of average weight change rate (APA, AIE)

N/sec로 하였다. 하중재하방향에 따른 AAF-G와 AAF-C 복합재의 압축강도 결과는 Table 7과 같다.

섬유직각방향으로 재하된 경우의 파괴형태는 전형적인 전단파괴의 양상을 나타냈으며, 섬유평행방향으로 재하된 경우는 편심에 의한 국소파괴나 제품의 편차를 제외한 경우 섬유접착부의 split failure의 형태를 나타내었다. 접촉면 방향에 따른 복합재의 압축강도 특성은 하중이 섬유직각방향으로 재하된 시편의 압축강도가 크게 평가되었으며, 양방향에서 평균 압축강도는 78.0 MPa 이상으로 우수한 압축강도 특성을 보였다. 한편 복합재의 제조

Table 7 Compressive strength comparison of AAF compound materials

Specimens	AAF-G		AAF-C	
	Parallel	Vertical	Parallel	Vertical
Load direction				
Number of specimen	10	10	10	10
Minimum value (MPa)	72.8	101.21	131.21	170.40
Maximum value (MPa)	80.96	135.53	169.33	219.91
Average value (MPa)	78.24	117.38	147.64	191.74
Coefficient of variation (%)	3.3	10.7	7.9	7.9
Recommended value (MPa)	70	100	130	170

시에는 초기 섬유함침 시 철저한 양생관리가 요구되며 온도 및 습도가 일정하지 않을 경우 제품의 변동폭이 커질 수 있다.

4.2 수중용 고성능 AAF 복합재의 인장특성 시험

AAF-G 복합재의 인장시험은 KS F 2241에 준하여 직접인장강도를 시험하였다. 인장시험체의 제작은 평판 위에 비닐을 덮고 그 위에 보강섬유에 수중 함침용 고성능 에폭시를 함침시켜 실온에서 2주간 양생하였다. 이후 다이아몬드 그라인더로 섬유방향으로 폭이 10 mm가 되도록 절단하고 Fig. 9와 같이 시험편의 양단부에 특수 제작된 탭(tap)을 부착하였다. 시험편의 중앙에는 종방향과 횡방향으로 변형률게이지를 붙여 인장시험을 실시하였다. 대상 시험편으로는 AAF-G와 AAF-C 복합재를 각각 8개씩 실험하였으며 양단부의 탭이 미끄러지면서 파괴되는 시험편은 대상에서 제외하였다.

AAF-G 복합재의 인장시험 결과는 Table 8과 같고, 평균적으로는 300 MPa를 초과하는 인장강도를 나타내고 있다. AAF-C 복합재의 인장강도 시험 결과를 분석해보면, AAF-C 복합재가 AAF-G 복합재보다 큰 인장강도를 가지고 있음을 알 수 있으며 보수재료로는 AAF-G를 사용하고, 보강재료로는 AAF-C를 사용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

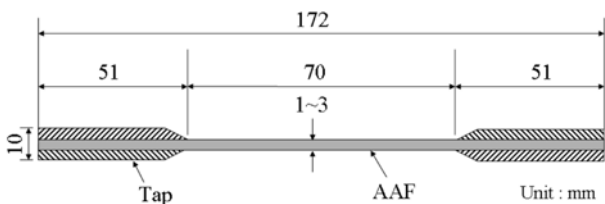


Fig. 9 Tensile specimen of AAF composite

Table 8 Tensile strength test result of AAF

Specimens	AAF-G	AAF-C
Number of specimen	8	8
Minimum value (MPa)	241.7	412.8
Maximum value (MPa)	355.0	640.9
Average value (MPa)	302.3	521.4
Coefficient of variation (MPa)	15.6	14.9
Recommended value (MPa)	240	400

4.3 수중용 고성능 AAF 복합재의 휨강도 시험

수중용 고성능 AAF 복합재의 휨시험은 두께 3~4 mm의 3층 적층 유리섬유를 3점 재하법으로 KS F 2242에 따라 수행하였으며, 시험 결과는 Table 9와 같다. 시험도중 인장부가 파괴에 이르기 전에 압축부의 섬유층간의 박리상태로 파괴되는 시험편의 경우는 제외하였다. 시험편의 파괴형태는 모두 휨하중에 의한 층간의 박리형태로 나타났는데, AAF-G복합재의 경우, 일반적인 육상용 섬유복합재보다 다소 작은 휨강도 값을 보이고 있다. 한편, AAF-C의 휨강도에서는 199 MPa의 평균 휨강도가 측정되었는데, 유리섬유 복합재에 대해서는 160 MPa, 탄소섬유복합재에 대해서는 180 MPa의 추천값을 사용하였다.

4.4 수중용 고성능 AAF 복합재의 경화수축시험

경화수축시험은 가로×세로 100 mm의 수중용 고성능 AAF 복합재를 축방향 및 축직교 방향으로 게이지를 부착하여 시간에 따른 경화수축값을 측정하여 평균값을 구하였다. 각 시험편에 대한 경화수축률의 측정 결과는 Fig. 10과 같다. 경화수축률은 2일 정도 경과 후부터 일정해졌으며, AAF-G 복합재의 경화수축률은 90×10^{-6} , AAF-C 복합재는 40×10^{-6} 의 변형률을 나타내었는데, 구속하여 사용하므로 경화수축에 따른 구조계 변화는 크지 않을 것으로 판단된다. 일반적인 에폭시 보강섬유의 경화수축률은 500×10^{-6} 이 넘는 것도 있으나, 이 연구의 AAF 복합재는 매우 작은 경화수축 거동을 보이고 있는 것을 알 수 있다.

4.5 수중용 고성능 AAF 복합재의 내화학성 시험

이 실험은 수중용 고성능 AAF 복합재를 KS M 3007에 따라 실시하였으며, 실험과정은 수중용 에폭시 실험 방법과 동일하다. 수중 복합재의 내화학성 시험 결과 약

Table 9 Flexural strength test result of AAF

Specimens	AAF-G	AAF-C
Number of specimen	8	8
Minimum value (MPa)	169.4	187
Maximum value (MPa)	251.4	215
Average value (MPa)	208.6	199
Recommended value (MPa)	160	180

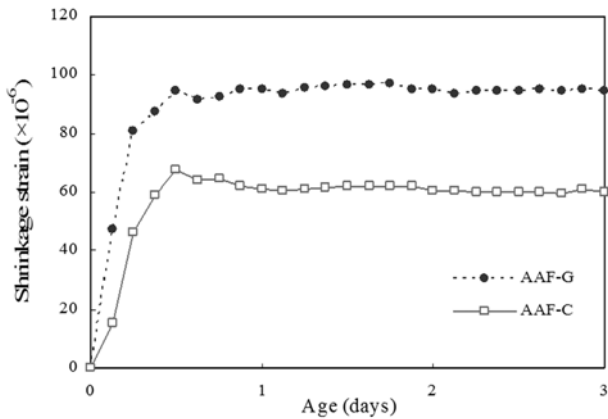


Fig. 10 Hardening shrinkage strain change curve by curing period

1% 내외의 중량변화가 발생하였으며, 황산 10% 및 염산 10%에 노출된 시편들은 변색 및 변형이 발생하므로 직접적으로 산에 노출될 때는 세심한 고려가 필요할 것으로 판단된다. 수중용 에폭시만을 시험한 결과보다 함침된 복합수지를 존치시켜 시험한 결과가 다소 중량변화가 높게 시험되었다.

4종류의 화학용액에 35일간 침지한 복합재 AAF-G와 AAF-C의 내화학성을 비교하면 Fig. 11과 같다. Fig. 11에서 알 수 있듯이 염화나트륨에 5주간 침지한 시편의 중량변화율은 약 0.5% 이내로 측정되어 이 연구에서 개발한 수중용 고성능 AAF 복합재의 우수한 내염 저항성을 확인하였다.

5. 기존 재료들과의 시공성 · 경제성 분석

국내 · 외에서 습윤 및 수중 구조물의 표면에 도포할 수 있는 접착제 및 에폭시 등은 몇 가지가 존재한다. 이들 제품 중에서 일반 페인트처럼 신나로 희석하여 모르타르, 콘크리트의 습윤면에 시공 가능한 제품이 있으나, 수중에서 도포가 불가능하고 도포된 면 위에 섬유복합재 등을 부착할 수 없는 한계가 있다. 또한, 소량의 퍼티형태로 판매되고 있는 반고체 반죽형 제품은 수중에서 부

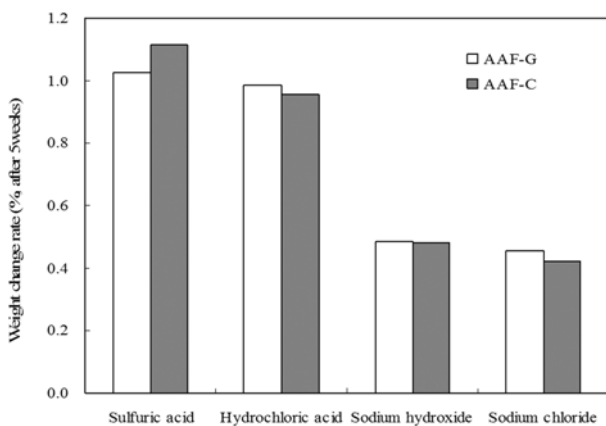


Fig. 11 Chemical resistance capacity of AAF

착이 가능하나, 선체의 구멍 보수, 물탱크의 보수에 적합하도록 손으로 반죽하여 보수면에 부착하는 형태를 갖는다. 이 또한, 마찬가지로 도포면 위에 섬유복합재 등을 부착할 수 없는 한계가 있다. 아래 Table 10은 개발된 수중용 접착제와 유사한 제품의 특성을 비교한 것이다. Table 10에서 보이는 것과 같이 개발된 수중용 접착제와 에폭시는 기존 제품에 비해 수중에서의 손실률이 5% 정도이며, 수중 공사 시공시 기름막이 형성되지 않는 장점을 갖는다. 또한, 초기경화가 4시간(20°C), 완전경화가 6일(20°C)로 다른 제품에 비해 우수한 것이 특징이며, 특히, 수중에서의 부착성과 작업성이 뛰어난 것으로 평가되었다.

개발된 수중용 접착 코팅제 및 함침제의 경제성을 평가하기 위해 유사 외국제품과의 판매단가를 Table 11과 같이 비교하였다. Table 11에서 알 수 있듯이 같은 사용 목적의 재료라 하더라도 접착 코팅제에 있어서 최대 약 36%, 함침제는 최대 약 50% 정도 가격이 저렴하여 유사 기존제품에 비해 더 경제적인 것을 알 수 있다. 또한, 에폭시가 함침된 복합재의 시공 소요비용도 최대 약 21% 정도 비용이 적게 소요되는 것으로 평가되었다.

개발된 수중용 접착제, 함침용 에폭시, 복합재는 Fig. 12와 같은 작업공정을 거친다. 따라서 구조물의 형상에 거의 제한이 없으며, 구조물에 손상을 주지 않기 때문에 구조물 공용 중에도 시공이 가능하며, 간단한 공정으로 인해 공사기간의 감소효과를 기대할 수 있어 공사비의 절감효과는 더 증대될 것으로 판단된다.

Table 10 Comparison of material characteristics

Type	Characteristics
A (Japan)	-Initial setting time (hour) : 24 (20°C) -Final hardening time (day): 7 (20°C) -Proper for local repair (pool, public bath, etc.) -Improper to repair large area for the high viscosity
B (UK)	-Initial setting time (hour) : 8 (20°C) -Final hardening time (day): 7 (20°C) -Proper for the repair in underwater and splash zone -Eco-friendly without heavy metal -High durability(more than 30 years) -High rate of epoxy loss in underwater construction (about 30%) -Low workability and bond strength for the low viscosity -Generation of oil layer
C (USA)	-Surface defect repair and crack filler -Putty type usage because of the high viscosity -Proper for local repair

Table 11 Comparison of material unit cost

Type	This study	A (Japan)	B (UK)
Primer adhesive	62,000 won/l	66,080 won/l	98,000 won/l
Impregnation epoxy	78,000 won/l	155,200 won/l	953,000 won/m ²
Composite construction (1 layer)	753,607 won/m ²	961,000 won/m ²	953,000 won/m ²



Fig. 12 Application process

6. 결 론

이 연구에서는 해수나 수중에 있는 콘크리트 구조물 및 강관구조의 보수보강에 사용할 수 있는 수중 에폭시 및 수중용 보강섬유수트 복합재를 개발하였다. 개발된 수중 경화용 에폭시의 다양한 성능실험을 통해 수중환경에서의 적용성을 평가하였다. 이 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 수중용 고성능 에폭시를 개발하기 위하여 최적 배합비를 도출하였고, 도출된 배합비를 바탕으로 다양한 성능평가를 수행하였다. 실험 결과로부터, 수중용 고성능 접착제(APA)와 수중 함침용 고성능 에폭시(AIE)는 수중 환경에 있는 콘크리트 구조물이나 강관구조물의 보수보강재료로 활용이 가능할 것으로 판단된다. 특히, 개발된 수중용 에폭시는 수중에서도 풀림이 없고 수중에서도 육상에서와 같은 부착성능을 발휘하는 것으로 나타났다. 또한, 이 연구에서는 개발된 재료의 성능 실험 결과로부터 개발된 수중용 고성능 접착제와 수중 함침용 고성능 에폭시의 기술적 최소요구조건을 도출하였다.
- 2) 개발된 수중용 보강섬유수트 복합재의 재료특성은 동일한 수중용 고성능 에폭시를 사용한다 하더라도, 함침된 섬유에 따라 달라지므로 탄소섬유와 유리섬유에 대해 각각의 성능시험을 수행하였다. 성능시험결과 AAF-G는 보수재료로 사용하고, AAF-C는 보강재료로 사용하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

또한 각 시험결과에서 안전측의 설계를 위해서 최소값을 적용하도록 제시하였다.

감사의 글

이 논문은 (주)콘크리닉의 재정적인 지원과 한국과학재단(과제번호 R01-2008-000-1117601)의 부분적인 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Karbhari, V. M. and Seible, F., "Fiber Reinforced Composite-advanced Materials for the Renewal of Civil Infrastructure," *Applied Composite Materials*, Vol. 7, No. 2-3, 2000, pp. 95~124.
2. Neale, K. W., "FRPs for Structural Rehabilitation: a Survey of Recent Progress," *Progress in Structural Engineering and Materials*, Vol. 2, No. 2, 2000, pp. 133~138.
3. Meier, U., Deuring, M., Meier, H., and Schwegler, G., "CFRP Bonded Sheets," *Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Properties and Applications*, Elsevier Science Publishers, Vol. 42, 1993, pp. 423~434.
4. ACI Committee 440, *State-of-the-art Report on Fiber Reinforced Plastic Reinforcement for Concrete Structure (ACI 440R-96)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1996, 65 pp.
5. ACI Committee 440, *Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP bars (ACI 440.1R-06)*, American Concrete Institute Committee 440, Farmington Hills, Mich., 2006, 44 pp.
6. Santoh, N., "CFCC (Carbon Fiber Composite Cable)," *Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Properties and Applications*, Elsevier Science Publishers, Vol. 42, 1993, pp. 223~247.
7. 이종열, 이용중, "구조물의 보수·보강 재료의 현황," 토목, 47권, 4호, 1999, pp. 34~45.
8. 박준명, 홍성남, 박선규, "에폭시 섬유관넬을 이용한 수중구조물의 단면보수시스템에 대한 성능평가," 대한토목학회 논문집, 24권, 1A호, 2004, pp. 159~166.
9. Michael, V. S. and Jeffrey, A. P., "FRP Materials for the Rehabilitation of Tubular Steel Structures, for Underwater Applications," *Composite Structures*, Vol. 80, No. 3, 2007, pp. 440~450.
10. Sen, R. and Mullins, G., "Application of FRP Composites for Underwater Piles Repair," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 38, No. 5-6, 2007, pp. 751~758.
11. Mullins, G., Sen, R., Suh, K., and Winters, D., "Underwater Fiber-reinforced Polymers Repair of Prestressed Piles in the Allen Creek Bridge," *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 9, No. 2, 2005, pp. 136~146.
12. Hancock, P. and Cuthbertson, R. C., "The Effect of Fiber Length and Interfacial Bond in Glass Fiber-Epoxy Resin Composites," *Journal of Material Science*, Vol. 5, No. 9, 1970, pp. 762~768.
13. Spanoudakis, J. and Young, R. J., "Crack Propagation in a

- Glass Particle-Filled Epoxy Resin,” *Journal of Material Science*, Vol. 19, No. 2, 1984, pp. 487~496.
14. Bazinet, S., Cereone, L., and Worth, F., “Composite FRP Moves into Underwater Repair Applications,” *Society for the Advancement of Material and Process Engineering (SAMPE) Journal*, Vol. 39, No. 3, 2003, pp. 8~16.
 15. Sen, R., Mullins, G., Suh, K., and Winters, D., “FRP Application in Underwater Repair of Corroded Piles,” *7th International Symposium on Fiber-Reinforced (FRP) Polymer Reinforcement for Concrete Structures*, ACI SP-230, Farmington Hills, Mich., Vol. 2, 2005, pp. 1139~1156.
 16. Mullins, G., Sen, R., Suh, K., and Winters, D., “A Demonstration of Underwater FRP Repair,” *Concrete International*, Vol. 28, No. 1, 2006, pp. 70~73.

요 약 현재 육상 노출 콘크리트 구조물의 보수 및 보강공법에는 많은 신기술이 개발되었고 연구도 많이 진행되고 있으나, 수중에 존치되어 있는 구조물, 즉 교각, 부두 잔교 및 강관파일과 같이 해수 및 수중에 잠겨 있으며, 지속적인 하중을 받는 콘크리트 및 강재의 보수보강 기술에 대한 연구는 많지 않다. 그러므로 이 연구에서는 해수나 수중에 있는 구조물의 보수·보강 공법에 사용할 수 있는 수중 에폭시를 개발하였고, 이 에폭시 재료와 보강섬유를 이용하여 수중용 FRP 복합재를 개발하였다. 개발된 재료의 성능을 검증하기 위하여 다양한 기초물성에 대한 시험을 수행하였다. 성능시험 결과, 개발된 에폭시는 수중에서도 풀림이 거의 없고 부유물질이 발생하지 않는다. 또한 수중이라는 제약 조건 속에서도 30,000 cps 이상의 높은 점성을 갖기 때문에 우수한 작업성을 보이며, 수중에서도 육상에서와 거의 유사한 2 MPa 이상의 부착성능을 발휘하는 것으로 나타났다. 내화학성 시험 결과에서도 중량변화율은 약 0.5~1.0% 이내로 측정되어 우수한 내염 저항성을 확인하였다.

핵심용어 : 보수·보강, 수중 에폭시, 수중용 FRP 복합재, 작업성, 접착성