제 2 절 고성능 콘크리트/포장재료 및 이용기술 개발

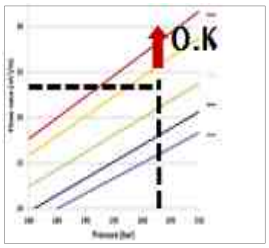
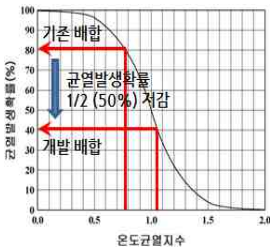
1. 공기단축형 콘크리트 및 현장타설 기술 개발

최근 건설되는 장대교량은 해당 국가의 랜드마크로서 건설기술에 대한 과시 및 침체된 경제에 활력을 불어넣어 주는 역할을 한다. 특히, 국내의 경우 장대교량의 주를 이루는 사장교 및 현수교의 설계 및 시공실적이 증가하고 있어 이 분야의 관련 기술이 비약적으로 발전하고 있다. 2000년 이전까지는 주경간 200m 이상의 교량의 경우 10년에 걸쳐 1~2개 밖에 건설되지 않았으나 2000년대 들어 사장교인 서해대교(주경간: 470m)와 현수교인 영종대교(주경간: 500m) 준공 이후 장대교량 건설이 급증하고 있으며 주경간 길이도 장대화되고 있는 추세이다. 또한, 국내 장대교량의 시장규모는 1990년대에 약 0.8조원 규모에 불과하였으나 2000년대에는 약 4.5조원 규모가 되었으며 2010년대에는 주경간이 1,545m인 이순신대교를 포함하여 현재 사업비를 추정할 수 있는 실적만 고려하더라도 6.7조원에 이를 것으로 예상되어 세계에서 가장 큰 시장 중 하나로 부상할 것으로 예상된다. 이렇듯 2000년 이후 장대교량 건설이 증가한 원인은 정부가 국토 가용면적 확대와 낙후지역 개발을 위하여 서남해안 개발 사업을 추진하고 있어 서남해안 도서를 연결하는 연육교 및 연도교의 발주 개수가 증가하고 있기 때문이다.

그러나 장대교량 건설시 콘크리트 구조물의 대형화에 따라 성공적인 시공을 위한 콘크리트 물성의 요구성능이 높아지고 있다. 사장교 및 현수교의 주경간 길이가 증가함에 따라서 주탑의 높이가 비례적으로 증가하고 하부 구조인 기초 또한 부재의 크기가 증가되는 것이 일반적이므로 이러한 고기능성 콘크리트에 대한 필요성은 계속 가속화 될 전망이다. 일반적으로 콘크리트 주탑 시공시 상부에 콘크리트를 운반하기 위해서 버킷과 펌핑을 이용하는 두 가지의 방법이 있다. 버킷의 경우 초기 비용은 비교적 저렴한 편이지만 주탑의 높이가 증가함에 따라서는 오히려 펌핑이 경제적인 방안이 될 수도 있다. 한편 해상교량의 하부구조에 타설하는 콘크리트의 경우 물과 접하는 경우가 많아 일부 중요 부위에는 수중불분리 콘크리트를 타설해야 하며 이 때 시공 효율성과 품질 안정화를 위한 방안이 필요하다. 따라서 점차 장대화 되어가는 초장대 교량에 적용하여 공기 단축 및 경제성 확보에 기여할

수 있는 고기능성 콘크리트의 기술은 크게 재료분리를 방지할 수 있는 범위에서 저점도 특성을 가져서 원활한 펌핑이 가능한 콘크리트를 제조하고 그 성능을 평가할 수 있는 기술과 해상기초의 수중 타설 작업시 시공 성능을 향상시킬 수 있는 고품질의 수중불분리 콘크리트 배합 제조기술 및 기존 보통포틀랜트 시멘트를 사용한 콘크리트와 비교하여 온도균열 발생이 적은 초저발열 콘크리트 제조기술이 필요할 것으로 판단된다. 따라서 위에서 제시한 초장대교량용 맞춤형 콘크리트의 핵심 기술을 정리하면 표 3-2-1-1과 같다.

표 3-2-1-1. 초장대교량 건설용 핵심기술

핵심 기술	주요연구개발 내용	
고주탑용 고압송 콘크리트		
	슬럼프 플로우	목표 점도 범위
앵커리지용 초저발열 콘크리트		
	배합별 온도 균열	단열온도 상승 시험기
해상기초용 수중불분리성 콘크리트		
	슬럼프 플로우	수중 슬럼프 플로우

가. 높이 400m 이상의 고주탑 시공용 고압송 콘크리트 개발 및 현장타설 기술 실용화

장대교량에서 주경간을 증가시키기 위해서는 그림 3-2-1-1과 같이 고주탑이 요구되며, 설계 및 시공 기술의 발전에 따라 주탑의 형식과 소재도 변화되어 갈 것으로 예상되나 최근에는 콘크리트 주탑이 주를 이루고 있다. 표 3-2-1-2는 주요 장대교양의 주경간과 콘크리트 주탑 높이의 비율을 정리한 것이다. 표 3-2-1-2에서 기존의 장대교량 형상비를 검토해 보면 향후 교량이 장대화 되어감에 따라서 콘크리트 주탑의 높이는 300m 이상이 요구될 것으로 판단된다. 따라서 본 연구개발에서는 그림 3-2-1-2의 연구수행 절차에 따라서 고주탑용 고압송 콘크리트를 개발하였고, 배합설계절차는 그림 3-2-1-3과 같다.



그림 3-2-1-1. 주탑의 재원

표 3-2-1-2. 장대교량 주경간장과 주탑높이 비율

교량명	교량형식	주탑형식	주경간(m)	주탑높이(m)	주탑높이/주경간
그레이트벨트대교	현수교	콘크리트	1,624	254	0.16
이순신대교	현수교	콘크리트	1,545	270	0.17
수통대교	사장교	콘크리트	1,088	306	0.28
인천대교	사장교	콘크리트	800	238.5	0.30
서해대교	사장교	콘크리트	470	182	0.39

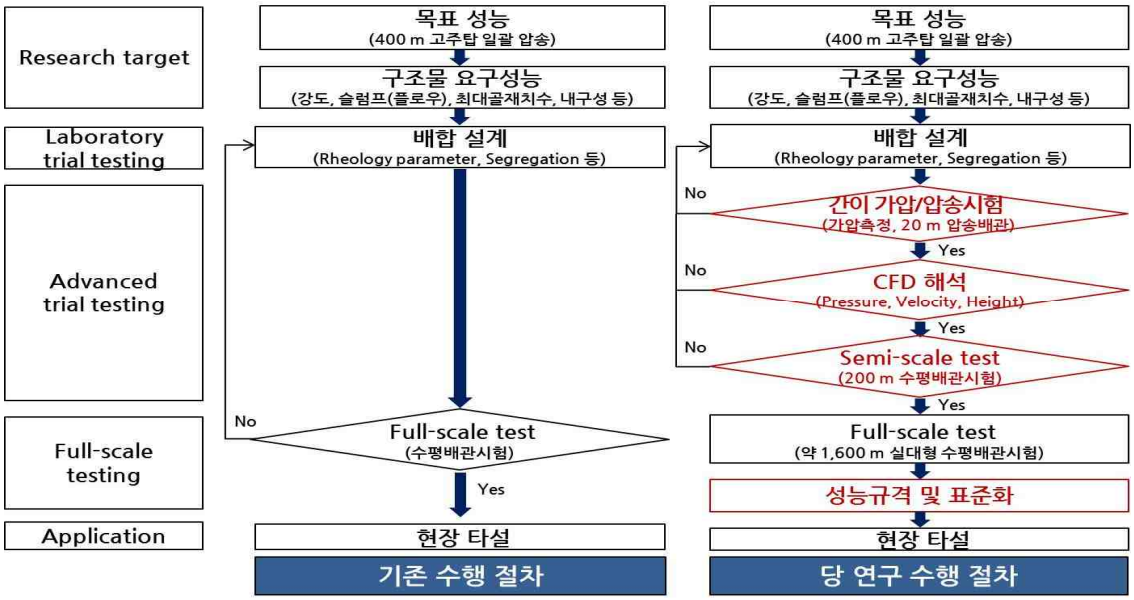


그림 3-2-1-2. 연구개발 수행 절차

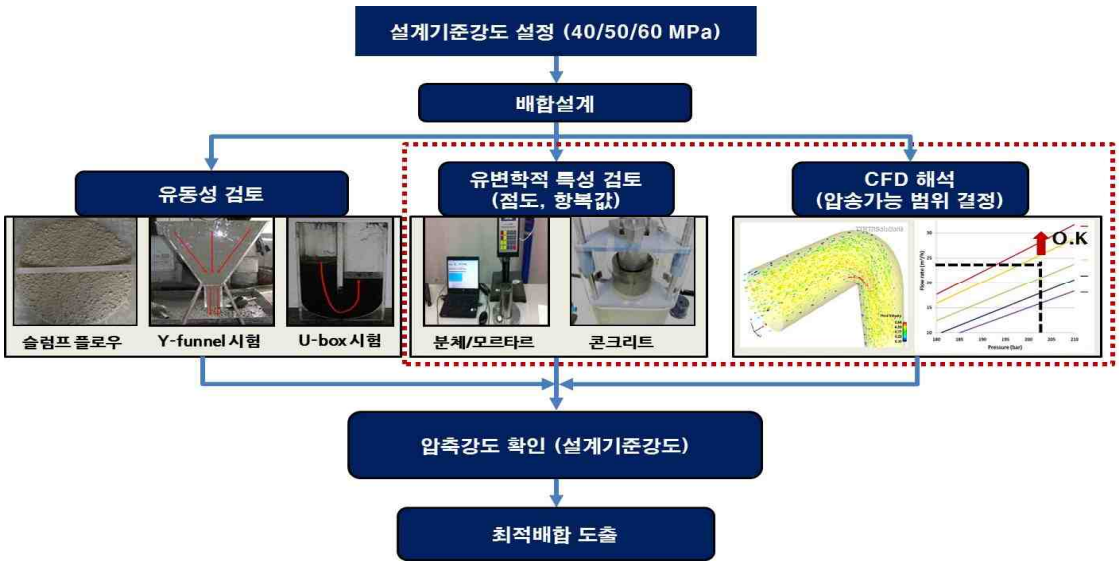


그림 3-2-1-3. 고주탑용 고압송 콘크리트 배합설계 절차

(1) 고주탑 시공용 고압송 콘크리트 개발

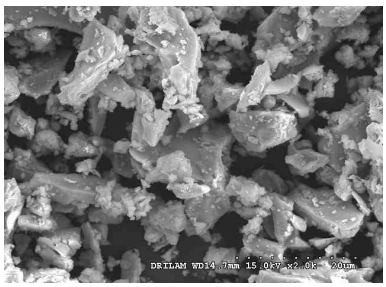
(가) 분체의 사용성 검토

고주탑 시공용 고압송 콘크리트를 개발하기 위해서 먼저 분체의 특성을 검토하였다. 수직 압송 높이 400m를 타설 하기 위해서는 콘크리트의 점성이 중요한 인자이다. 즉 가능한 범위에서 콘크리트의 구성재료들 간의 재료분리현상 없이 저점도의 특성을 가진 콘크리트를 제조할 수 있는 배합기술이 필요하다. 따라서 본 연구개발에서는 플라이애쉬, 고로슬래그 미분말 및 석회석 미분말의 활용성을 검토하였다. 표 3-2-1-3은 분체들의 화학성분 및 물리적 특성을 정리한 것이며, 그림 3-2-1-4는 분체들의 입자사진을 정리한 것이다.

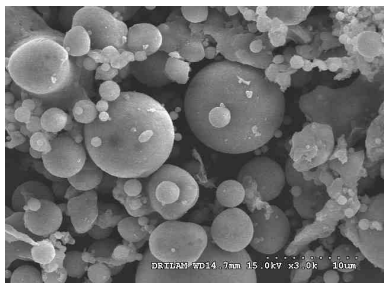
표 3-2-1-3. 분체의 화학성분

Types	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)	Na_2O (%)	K_2O (%)	MgO (%)	SO_3 (%)	L.O.I (%)	Density (g/㎤)	Specific Surface Area (㎠/g)
OPC	21.60	6.00	3.10	61.40	-	-	3.40	2.50	0.03	3.15	3,540
LSP	11.06	4.13	1.14	43.80	0.18	1.02	1.42	0.30	35.66	2.69	4,170
FA	58.20	26.28	7.43	6.51	0.80	-	1.10	0.30	3.20	2.18	3,550
GGBF	33.33	15.34	0.44	42.12	-	-	5.70	2.08	3.00	2.90	4,160

주) OPC : Ordinary Portland Cement
FA : Fly Ash
GGBF : Ground Granulated Blast Furnace slag
LSP : Lime Stone Powder



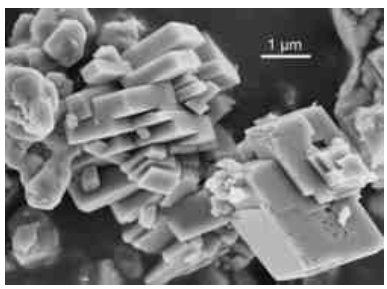
(a) OPC



(b) FA



(c) GGBF



(d) LSP

그림 3-2-1-4. 분체의 입형(SEM)

분체의 사용성 검토를 위한 유변학적 특성 검토는 실린더형 스핀들(No.16, 점도 범위: 240～4.8 M・cP)을 사용한 Brookfield viscometer(Model LVDV-Ⅱ+)를 이용하여 전단률(Shear rate)의 변화에 따른 전단응력(Shear stress)을 측정하였다. 이때, shear rate는 Hysteresis loop area에 의한 측정값의 이력현상을 피하기 위하여 100, 50, 30, 20, 12 및 5rpm의 하강계단식으로 회전속도를 변화하여 측정하였으며, 시료와 스핀들의 접촉면 및 용기의 사이즈를 고려한 계수(0.29)를 적용하여 산출된 Shear stress를 직선회귀를 통해 빙함유체(Bingham equation)로 해석하여 항복응력 및 평균소성점도를 측정하였다. 그림 3-2-1-5는 Brookfield 점도계를 나타낸 그림이며, 그림 3-2-1-6 및 3-2-1-7은 Hysteresis loop area와 Bingham 모델을 정리한 그림이다.

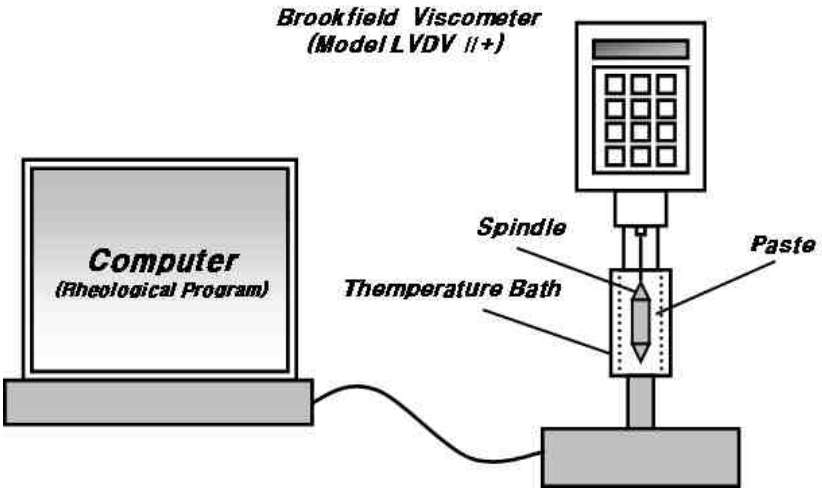


그림3-2-1-5. Brookfield 점도계 (모델 : LVDV-Ⅱ+)

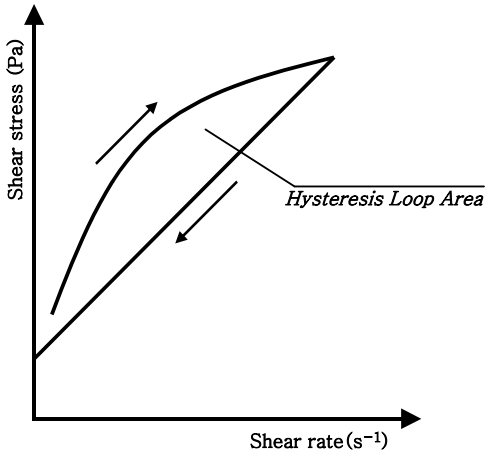


그림3-2-1-6. Hysteresis Loop Area

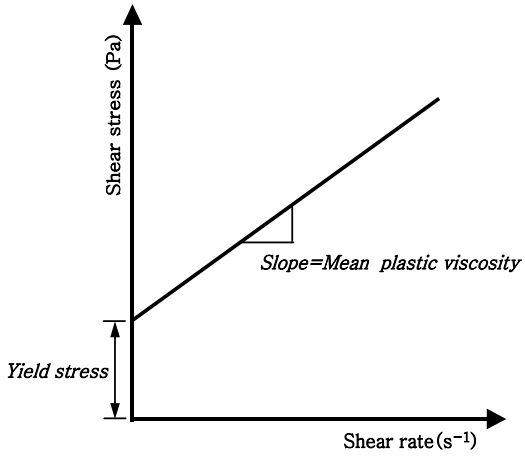


그림 3-2-1-7. Bingham 모델

또한, 분체의 유변학적 특성 검토와 함께 사용 분체를 완전 구형으로 가정하여 분체입자를 둘러싸고 있는 가상수막두께를 산정하였다. 그림 3-2-1-8은 입자의 가상수막두께를 나타낸 것으로 이를 산정하기 위해 제안된 계산원리는 다음과 같다 (최연왕, 2006).

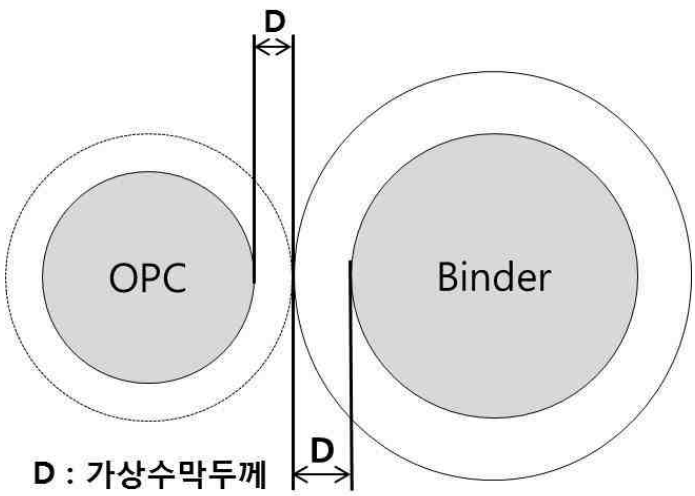


그림 3-2-1-8. 가상수막두께

페이스트의 유동성 및 점성은 시멘트 입자를 단입입경의 완전 구형 입자로 가정 시 액체의 점성 및 입자의 밀도와 관계가 있으며, 1개 입자에 대한 평균 액체량(가상수막)에 반비례하므로 식 (3-2-1-1)과 같이 나타낼 수 있으며, 가상수막 두께에

관한 식으로 정리하면 식 (3-2-1-2)와 같다.

$$\frac{\frac{4}{3}\pi(r+D)^3N-\frac{4}{3}\pi r^3N}{\frac{4}{3}\pi r^3N\rho}=\frac{W}{C} \qquad (3\text{-}2\text{-}1\text{-}1)$$

$$D=r\left(\sqrt[3]{\frac{W}{C}\rho+1}-1\right) \qquad (3\text{-}2\text{-}1\text{-}2)$$

여기서, D = 가상수막두께
N = 시멘트 페이스트 1g에 있는 입자수
r = 입자의 반경
ρ = 입자의 밀도 (g/㎤)

한편, 시멘트 입자의 반경 r을 산정하기 위해 입자 1g의 밀도 및 비표면적을 고려하면, 식 (3-2-1-3) 및 (3-2-1-4)로 나타낼 수 있으며, 두 식을 통하여 식 (3-2-1-5)로 표현 할 수 있다.

$$\frac{4}{3}\pi r^3N\rho=1 \qquad (3\text{-}2\text{-}1\text{-}3)$$

$$4\pi r^2N=1\times a \qquad (3\text{-}2\text{-}1\text{-}4)$$

$$r=\frac{3}{a\rho} \qquad (3\text{-}2\text{-}1\text{-}5)$$

여기서, a = 입자의 비표면적 (㎠/g)

식 (3-2-1-2)에 입자의 밀도 및 비표면적으로 고려한 식 (3-2-1-5)를 대입하면 최종적으로 식 (3-2-1-6)과 같이 간략화 할 수 있으며, 이 식을 통하여 입자의 가상수막두께를 산정하였다.

$$D=\frac{3}{a\rho}\left(\sqrt[3]{\frac{W}{C}\rho+1}-1\right) \qquad (3\text{-}2\text{-}1\text{-}6)$$

여기서, a = 비표면적 (㎠/g)

ρ = 밀도 (g/㎤)

① 분체의 유변학적 특성

그림 3-2-1-9는 각 분체별로 유변학적 특성을 검토하기 위해서 페이스트를 제조한 후 점도 및 항복값을 측정하여 정리한 것이다. 그림 3-2-1-9의 결과 점도는 보통포틀랜트 시멘트(OPC)〉 플라이 애쉬(FA)〉 고로슬래그 미분말)GGBF〉 석회석 미분말(LSP) 순으로 측정되었다. FA의 경우 입형이 구형이고 GGBF는 비결정의 유리질이며, LSP와 함께 표면이 매끄러운 특성으로 인하여 점도가 감소하는 것으로 판단된다(Hewlett, 2003). 항복값의 경우는 OPC와 FA비슷한 값을 보였고 다음으로는 GGBF와 LSP가 비슷한 값을 나타내었다. FA의 경우 입형이 구형이지만 미연소 탄분이 사용 수량을 흡수하였기 때문에 유동성에 영향을 미치는 항복값에 크게 영향을 미치지 못한 것으로 판단된다. 또한 식 (6)에 의한 가상수막 두께를 계산한 결과 OPC는 1.07, LSP는 0.94, FA는 1.16 및 GGBF는 0.93㎛로 계산되었다. 비표면적이 비슷한 값을 보이는 OPC와 FA, GGBF와 LSP의 가상수막 두께가 유사하게 계산되어 유변학적 특성에도 영향을 주는 것으로 판단된다.

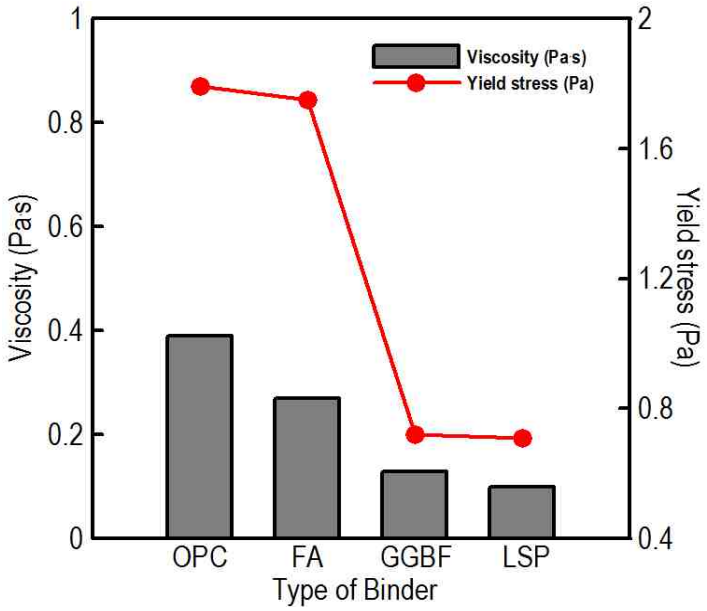
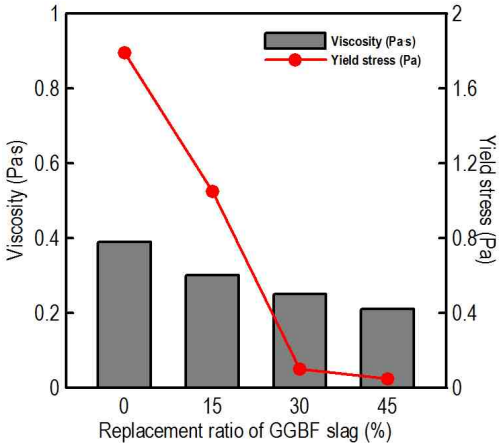


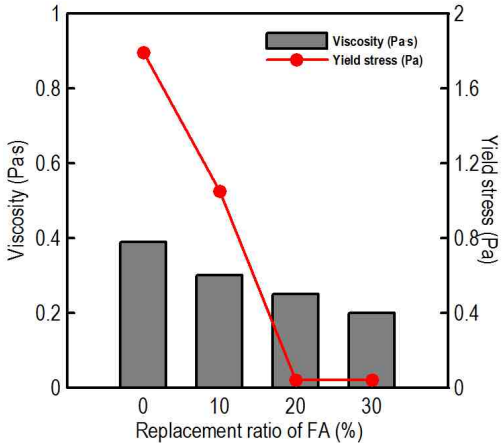
그림 3-2-1-9. 분체별 페이스트의 점도 및 항복값

② 분체의 혼합률에 따른 페이스트의 점도 및 항복값

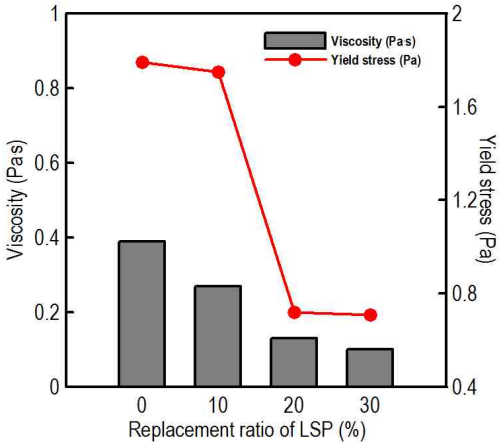
그림 3-2-1-10의 (a), (b), (c) 및 (d)는 각각의 분체(GGBF, FA, LSP, SF)들의 혼합률에 따라 페이스트의 점도 및 항복값을 정리한 것이다. 사용 분체의 혼합률이 증가함에 따라서 실리카 흄을 제외하고는 점도 및 항복값이 감소하는 경향이 있다 (Kim, 2012). 실리카 흄의 경우 다른 분체와는 달리 입자의 크기가 작고 비표면적이 크기 때문에 물과 접하는 부분이 많아져 유동성이 감소하고 점성이 증대되어 점도 및 항복값이 증가하는 것으로 판단된다.



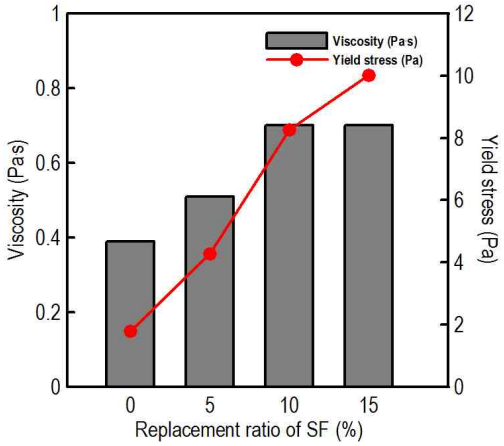
(a) 고로슬래그 미분말(GGBF) 혼합률에 따른 점도 및 항복값



(b) 플라이 애쉬(FA) 혼합률에 따른 점도 및 항복값



(c) 석회석 미분말(LSP) 혼합률에 따른 점도 및 항복값

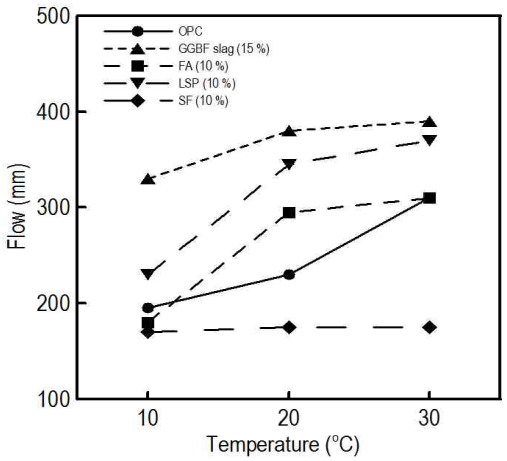


(d) 실리카 흄(SF) 혼합률에 따른 점도 및 항복값

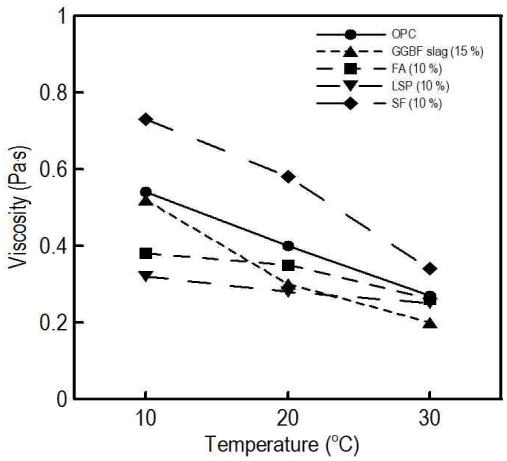
그림 3-2-1-10. 분체의 혼합률 별 페이스트의 점도 및 항복값

③ 온도의 변화에 따른 페이스트의 특성

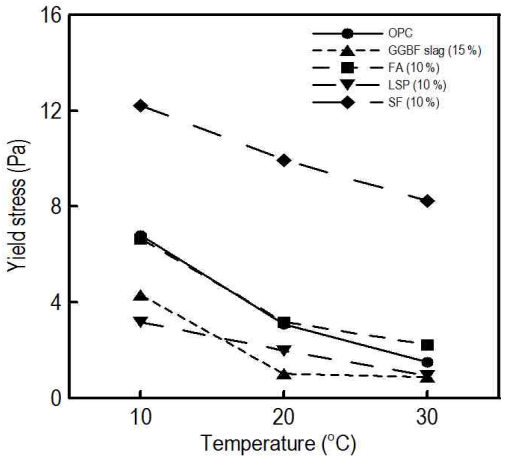
그림 3-2-1-11은 사용 온도의 변화에 따른 페이스트의 특성을 플로우, 점도 및 항복값을 정리한 것이다. 그림 3-2-1-11에서 (a)의 결과 온도가 10, 20 및 30℃로 증가함에 따라서 플로우는 증가하는 경향이 있다. 그러나 그림 (b) 및 (c)의 결과는 온도가 10, 20 및 30℃로 증가함에 따라서 점도 및 항복값은 다소 감소하는 경향이 있다. 이상의 결과를 통하여 페이스트의 플로우와 점도 및 항복값은 반비례의 관계를 나타내는 것으로 나타났다.



(a) 페이스트의 슬럼프 변화



(b) 페이스트의 점도 변화



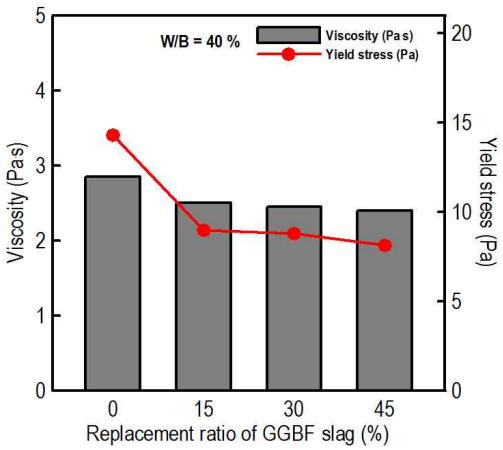
(c) 페이스트의 항복값 변화

그림 3-2-1-11. 온도에 따른 페이스트의 점도 및 항복값

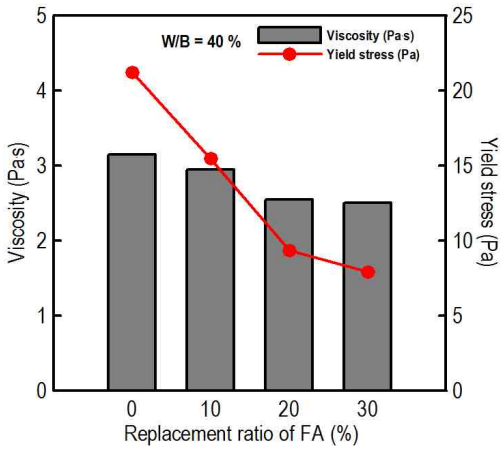
(나) 모르타르의 사용성 검토

① 분체의 혼합률에 따른 모르타르의 점도 및 항복값

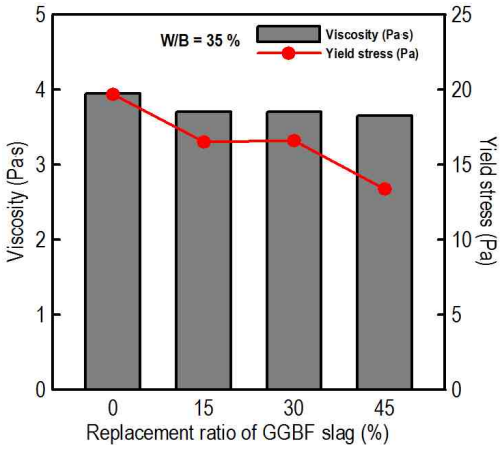
그림 3-2-1-12는 물-시멘트(W/C)비 2종류 및 고로슬래그 미분말(GGBF)과 플라이 애쉬(FA)의 혼합률에 따른 모르타르의 점도 및 항복값을 정리한 것이다. GGBF의 경우는 혼합률이 증가함에 따라서 점도 및 항복값이 감소하는 경향을 보이고 있으나, FA의 경우는 점도 및 항복값이 혼합률이 증가함에 따라서 일정하게 감소 또는 증가하는 경향이 없었다. 이러한 현상은 FA의 경우 입자 모양이 구형으로서 유동성 향상에 기여하지만 미연소 탄분의 함유량을 관리하지 못할 경우 오히려 유동성을 저하시키는 것으로 알려져 있으며 사용시 적절한 관리가 필요할 것으로 판단된다.



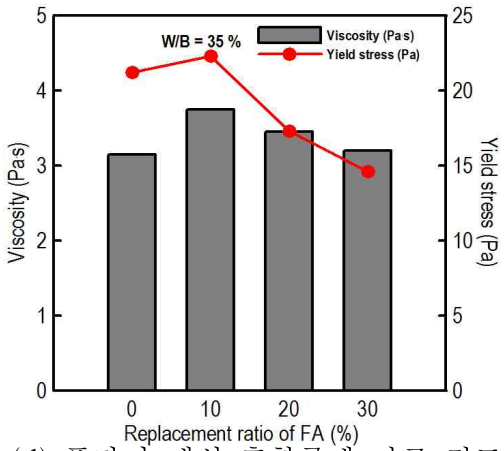
(a) 슬래그 혼합률에 따른 점도 및 항복값



(b) 플라이 애쉬 혼합률에 따른 점도 및 항복값



(c) 슬래그 혼합률에 따른 점도 및 항복값

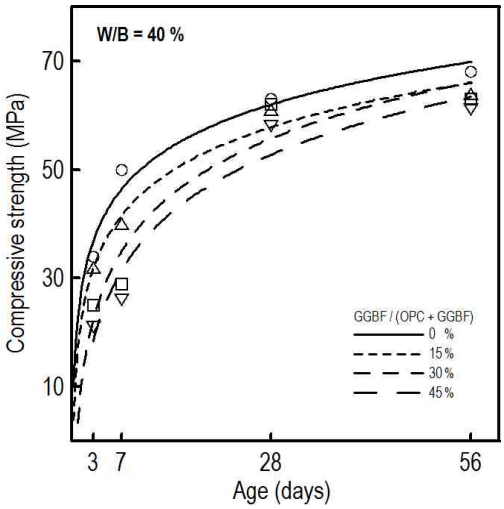


(d) 플라이 애쉬 혼합률에 따른 점도 및 항복값

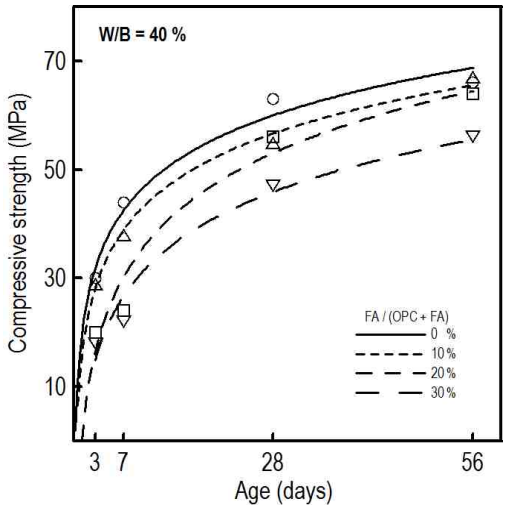
그림 3-2-1-12. 분체의 혼합률에 따른 모르타르의 점도 및 항복값

② 분체의 혼합률에 따른 모르타르의 재령에 따른 압축강도

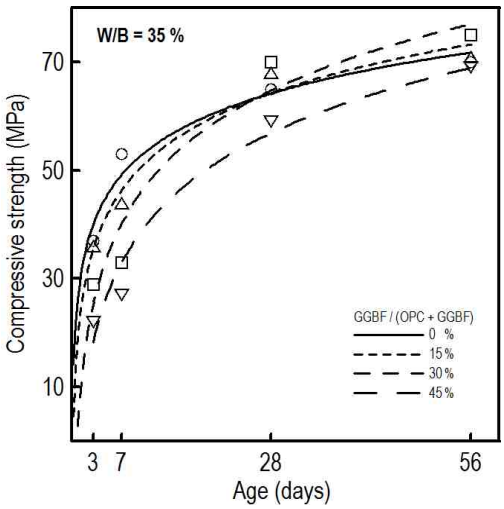
그림 3-2-1-13은 물-결합재비(W/C)비 2종류 및 고로슬래그 미분말(GGBF)과 플라이 애쉬(FA)의 혼합률에 따라 모르타르의 재령 별 압축강도를 정리한 것이다. 모르타르의 압축강도는 FA 30% 혼합한 경우를 제외하고는 재령 28일에서 기준 모르타르(OPC 100%)와 비교하여 90% 이상 압축강도가 발현되었다. 향후 설계기준강도를 고려하여 GGBF 및 FA의 혼합률을 결정할 필요가 있을 것으로 판단된다.



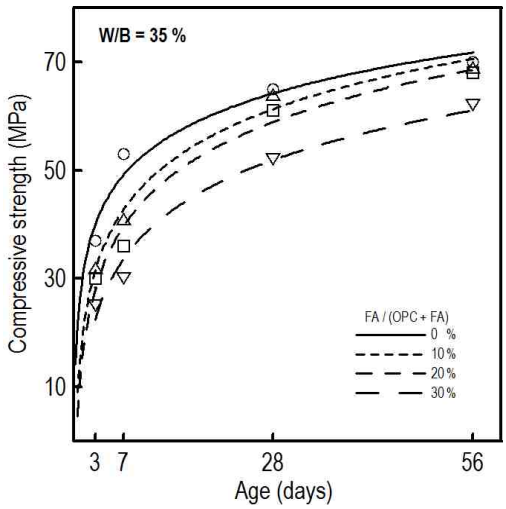
(a) 슬래그 혼합률에 따른 압축강도



(b) 플라이 애쉬 혼합률에 따른 압축강도



(c) 슬래그 혼합률에 따른 압축강도



(d) 플라이 애쉬 혼합률에 따른 압축강도

그림 3-2-1-13. 분체의 혼합률에 따른 모르타르의 재령별 압축강도

(다) 콘크리트의 사용성 검토

수직 압송 높이 400m를 타설 하기 위해서는 콘크리트의 점성이 중요한 인자이다. 즉 가능한 범위에서 콘크리트의 구성재료들 간의 재료분리현상 없이 저점도의 특성을 가진 콘크리트를 제조할 수 있는 배합기술이 필요하다. 따라서 본 연구개발에서는 분체, 모르타르의 특성을 검토한 후 콘크리트의 특성을 검토하였다. 표 3-2-1-4는 사용골재의 물리적 성질을 정리한 것이다.

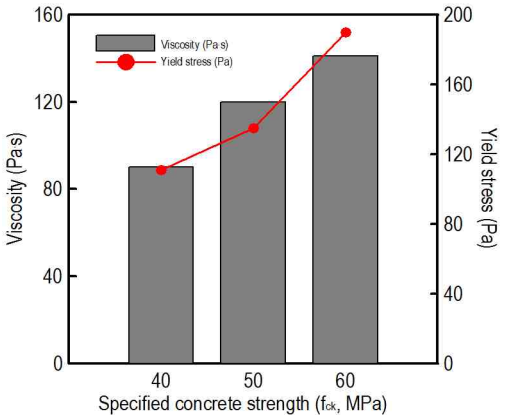
표 3-2-1-4. 사용골재의 물리적 성질

Types	G_{max} (mm)	Density (g/cm^3)	Absorption (%)	F.M.	Bulk density (kg/m^3)	Percentage of solids(%)	Crushing (%)
G	25	2.64	0.80	7.10	1,610	62.0	14.6
S	-	2.59	2.43	2.80	1,666	62.6	-

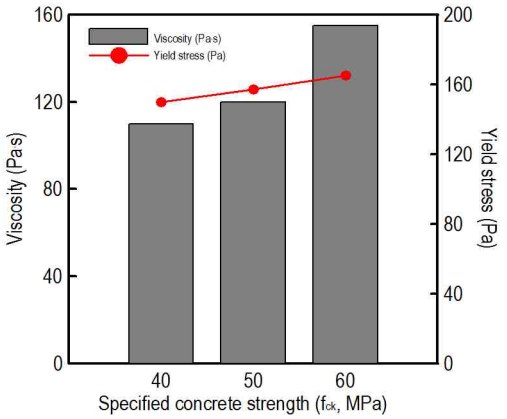
주) G : 굵은골재
S : 잔골재

① 분체의 혼합률에 따른 콘크리트의 점도 및 항복값

그림 3-2-1-14는 설계기준강도에 따른 보통포틀랜트 시멘트(OPC) 100%, OPC 90% + 플라이 애쉬(FA) 10%를 사용한 콘크리트의 점도 및 항복값을 정리한 것이다. 점도 및 항복값은 설계기준강도가 증가함에 따라서 비례적으로 증가하는 경향을 나타내고 있었다. 이러한 경향은 설계기준강도의 증가로 인하여 W/B 낮아지고, 따라서 사용 분체량이 많아져 점도 및 항복이 증가한 것으로 판단된다.



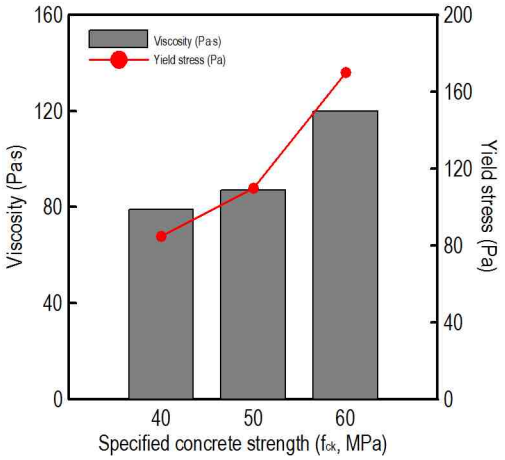
(a) 설계기준강도에 따른 유변학적 특성 (OPC)



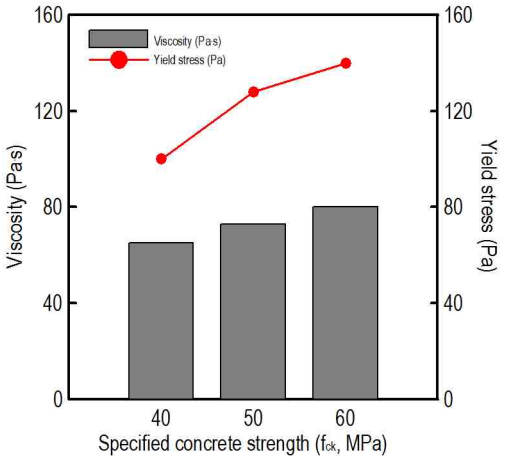
(b) 설계기준강도에 따른 유변학적 특성 (OPC+FA)

그림 3-2-1-14. 설계기준강도에 따른 점도 및 항복값 (OPC 및 2성분계)

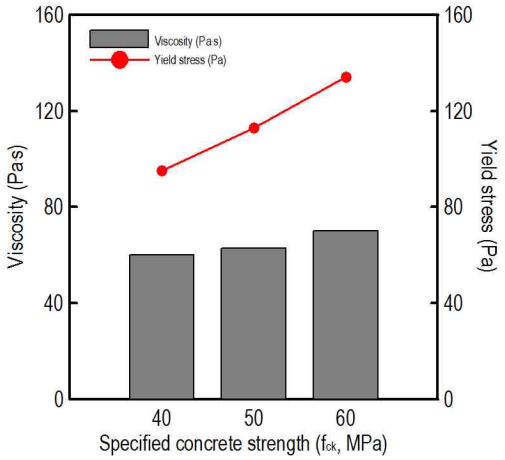
그림 3-2-1-15는 고로슬래그 미분말(GGBF), 플라이 애쉬(FA) 및 실리카 흄(SF)을 사용한 2성, 3성 및 4성분계 콘크리트의 설계기준강도별 점도 및 항복값을 정리한 것이다. OPC 및 FA를 사용한 2성분계와 비교하여 점도 및 항복값이 감소하는 경향을 보이고 있다. 이러한 원인은 GGBF, FA의 입자특성과 관련이 있고, 적절한 SF의 사용으로 유동성이 향상되었기 때문으로 판단된다.



(a) 설계기준강도에 따른 유변학적 특성 (OPC+GGBF)



(b) 설계기준강도에 따른 유변학적 특성 (OPC+GGBF+FA)

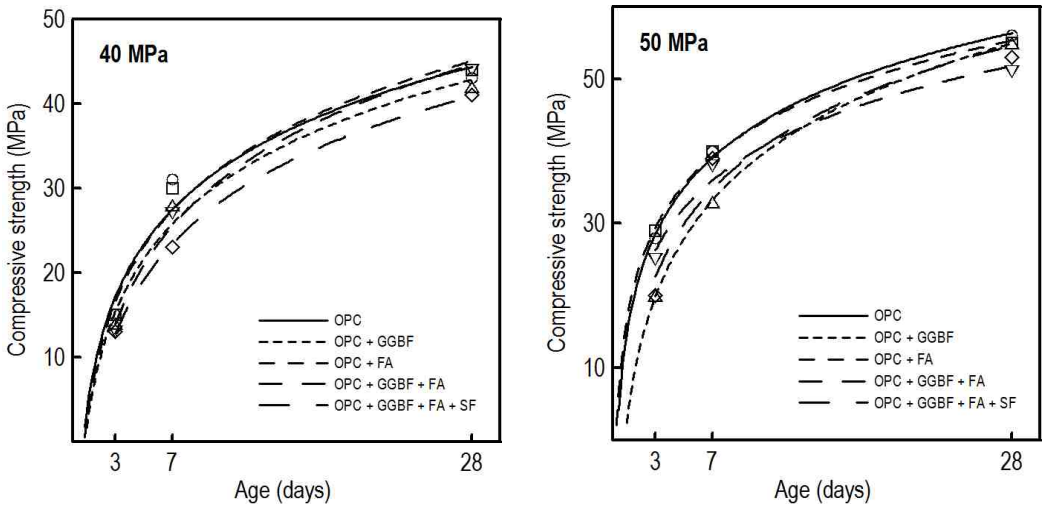


(c) 설계기준강도에 따른 유변학적 특성 (OPC+GGBF+FA+SF)

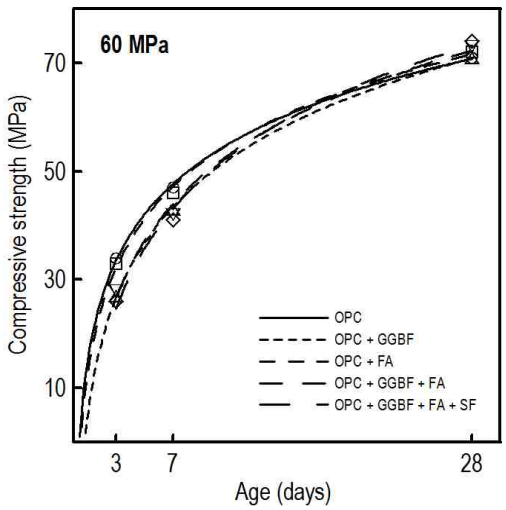
그림 3-2-1-15. 설계기준강도에 따른 점도 및 항복값 (2성, 3성 및 4성분계)

② 분체의 혼합률에 따른 콘크리트의 재령에 따른 압축강도

그림 3-2-1-16은 보통포틀랜트 시멘트(OPC)와 함께 고로슬래그 미분말(GGBF), 플라이 애쉬(FA) 및 실리카 흄(SF)을 함께 사용한 2성, 3성 및 4성분계 콘크리트의 설계기준강도별 압축강도를 정리한 것이다. 재령 28일 압축강도의 경우 모든 배합에서 설계기준강도를 만족하는 것으로 나타났다.



(a) 분체 종류에 따른 제령별 압축강도 (b) 분체 종류에 따른 제령별 압축강도



(c) 분체 종류에 따른 제령별 압축강도

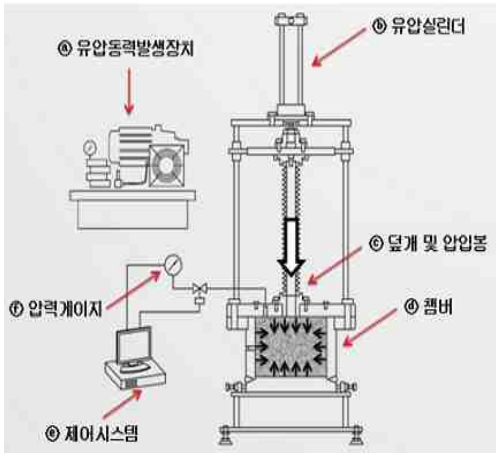
그림 3-2-1-16. 설계기준강도에 따른 점도 및 항복값 (2성, 3성 및 4성분계)

(2) 간이 압송 평가 장비에 의한 압송 전·후의 물성 검토

고압송용 콘크리트를 높은 공간에 펌프압송할 경우 압송관내 콘크리트가 받는 압력을 재현할 수 있는 가압장치를 고안하여, 이를 통하여 펌프압송시 압송관내 압력변화에 따른 고압송용 콘크리트의 펌프압송후 품질을 예측할 수 있는 방안에 대하여 검토하였다.

(가) 입체가압형 가압장치에 의한 물성 검토

그림 3-2-1-17의 (a)는 개발된 장비의 상세도를 나타낸 것이다. 작동원리는 그림 3-2-1-17과 같이 챔버내 압입봉을 삽입함으로써 체적변화를 통하여 챔버내 콘크리트에 입체적인 압력을 형성하는 원리이다. 개발된 장비는 챔버 용량 약 12ℓ이며, 최대압력 30MPa까지 형성할 수 있다. 또한, 제어시스템을 통하여 압력 및 시간(가압·유지·감압)을 설정하여 다양한 압송조건을 재현할 수 있다. 그림 3-2-1-17의 (b)는 개발된 입체가압형 가압장치를 나타낸 것이다. 표 3-2-1-5는 입체가압형 가압장치 사양을 정리한 것이다. 그림 3-2-1-18은 개발된 장비를 이용한 품질예측 평가 방법을 나타낸 것이다. 그림 3-2-1-18과 같이 챔버내 콘크리트 투입 후 덮개 및 압입봉을 결합한 다음 제어시스템을 통하여 가압장치를 작동할 수 있으며 이러한 방법으로 다양한 압송조건에 따른 실제 펌프압송시 압송관내 고유동 콘크리트가 받는 압력을 재현할 수 있다.



(a) 장비 상세도



(b) 장비 전경

그림 3-2-1-17. 입체가압형 가압장비

표 3-2-1-5. 입체가압형 가압장치 사양

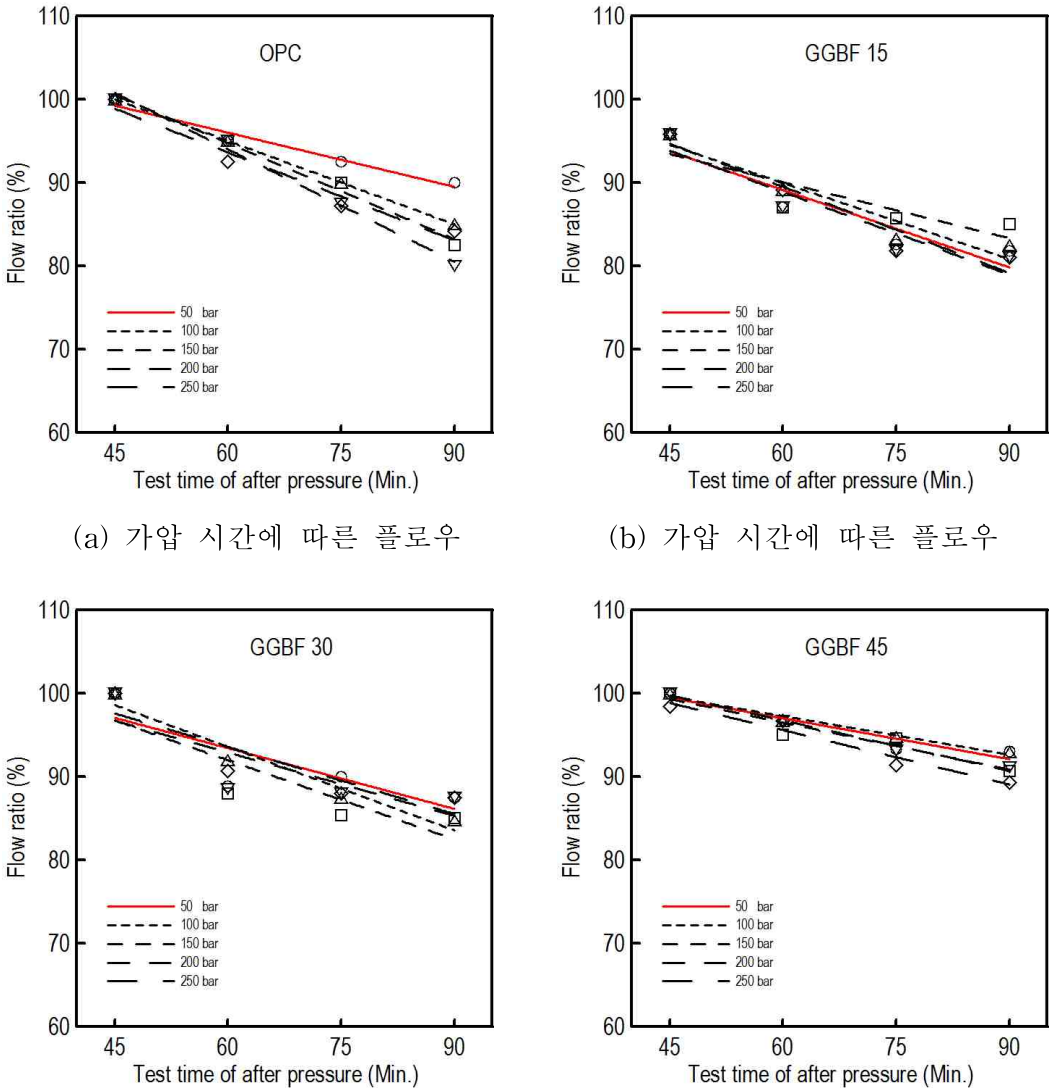
항 목	사 양
챔버 용량	12 (ℓ)
최대 압력	300 (bar)
시간 설정	0 ~ 30 (min)
제어시스템	압력 및 시간 설정 (가압-유지-감압)
평가 항목	펌핑용 콘크리트 품질 평가



그림 3-2-1-18. 입체가압형 가압장치 적용 실험 방법

① 가압후 모르타르의 플로우 특성

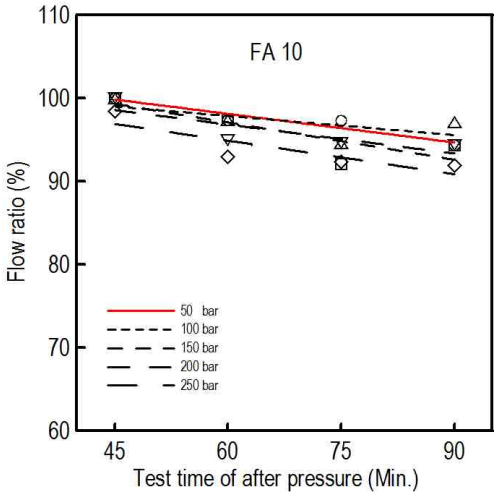
그림 3-2-1-19는 고로슬래그 미분말(GGBF)의 혼합률에 따른 가압시간과 플로우 비의 관계를 정리한 것이다. 가압시간이 경과함에 따라서 가압의 범위(50~250 bar)와 관계없이 플로우는 감소하는 것으로 나타났다. GGBF의 혼합률이 증가함에 따라서 유동성이 향상되어 플로우비가 다소 증가하는 경향을 나타내었다. 그림 3-2-1-20은 플라이 애쉬(FA)의 혼합률에 따른 가압시간과 플로우 비의 관계를 정리한 것이다. 가압시간이 경과함에 따라서 가압의 범위(50~250 bar)와 관계 없이 감소하는 것으로 나타났다.



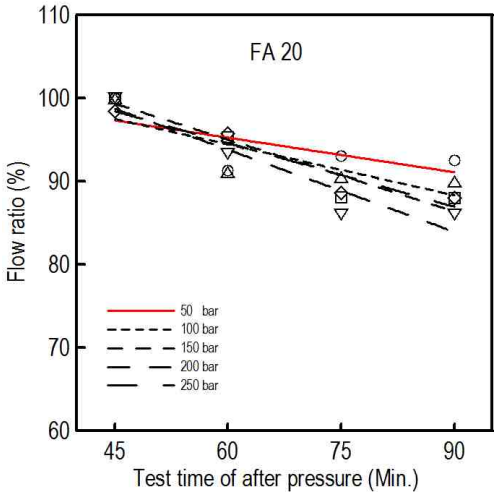
(a) 가압 시간에 따른 플로우 (b) 가압 시간에 따른 플로우

(c) 가압 시간에 따른 플로우 (d) 가압 시간에 따른 플로우

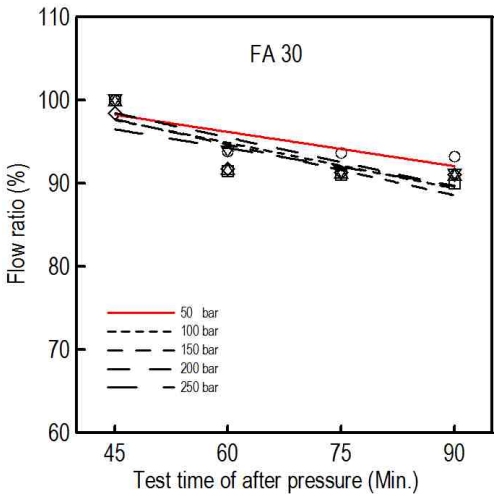
그림 3-2-1-19. 고로슬래그 미분말 혼합률 별 가압 시간에 따른 플로우



(a) 가압 시간에 따른 플로우



(b) 가압 시간에 따른 플로우



(c) 가압 시간에 따른 플로우

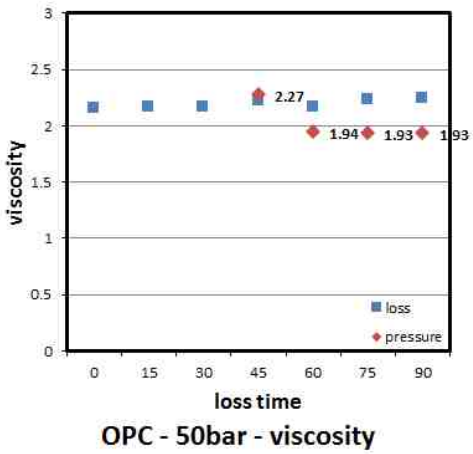
그림 3-2-1-20. 플라이 애쉬 혼합률 별 가압 시간에 따른 플로우

② 가압후의 유변학적 특성

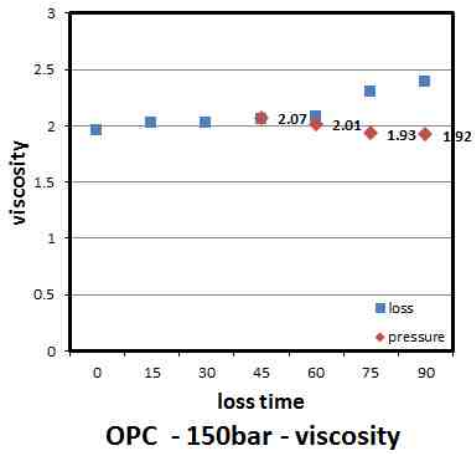
㉮ 점도 특성

- OPC

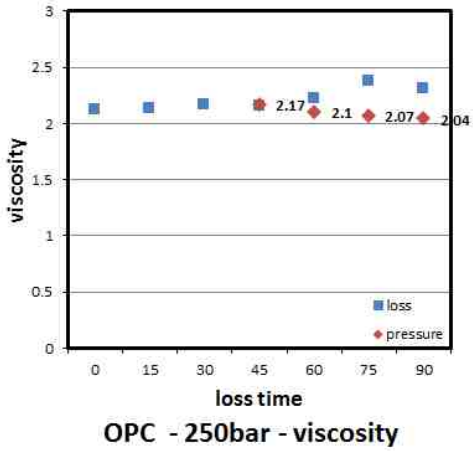
그림 3-2-1-21은 보통포틀랜트 시멘트(OPC)를 사용한 모르타르의 가압 수준별 가압시간에 따른 점도를 가압하지 않고 경과 시간만 고려한 점도와 비교하여 정리한 것이다. 모든 가압 범위에서 가압시간 45분 후에 가압한 경우의 점도가 압력을 가하지 않은 경우와 비교하여 낮아지는 경향이 있다.



(a) 경과시간 및 가압 후의 점도 변화



(b) 경과시간 및 가압 후의 점도 변화

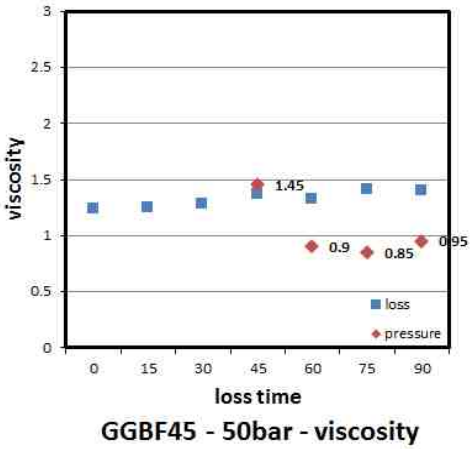


(c) 경과시간 및 가압 후의 점도 변화

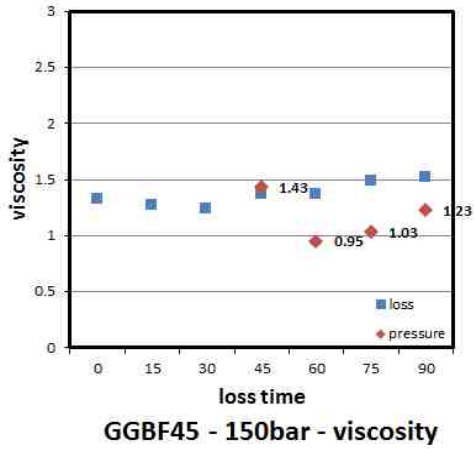
그림 3-2-1-21. 가압 수준에 따른 경과시간 및 가압 후의 점도 변화

- GGBF 45

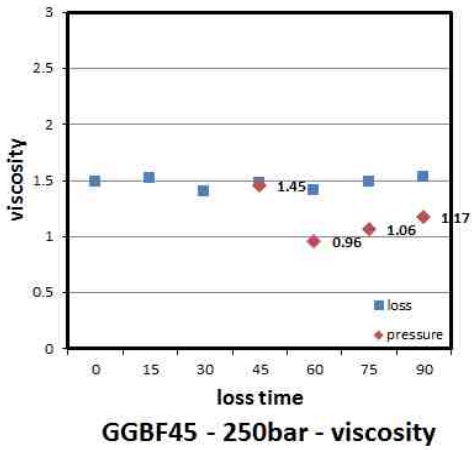
그림 3-2-1-22는 고로슬래그 미분말(GGBF) 45%를 사용한 모르타르의 가압 수준별 가압시간에 따른 점도를 가압하지 않고 경과 시간만 고려한 점도와 비교하여 정리한 것이다. 모든 가압 범위에서 가압시간 45분 후에 가압한 경우의 점도가 압력을 가하지 않은 경우와 비교하여 낮아지는 경향이 있다. GGBF 45% 혼합한 경우 유동성 향상 효과 등으로 인하여 낮은 점도 범위를 나타내고 있다.



(a) 경과시간 및 가압 후의 점도 변화



(b) 경과시간 및 가압 후의 점도 변화

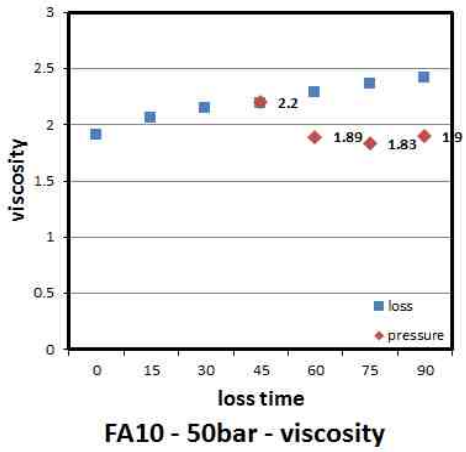


(c) 경과시간 및 가압 후의 점도 변화

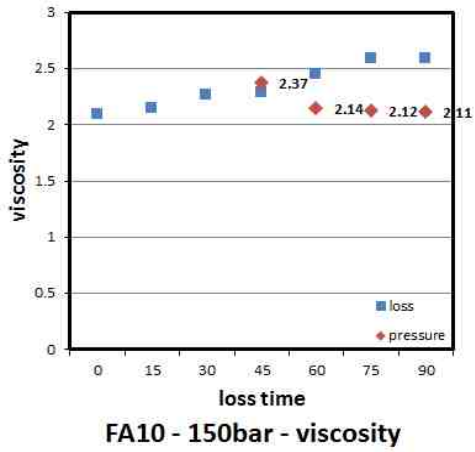
그림 3-2-1-22. 가압 수준에 따른 경과시간 및 가압 후의 점도 변화

- FA 10

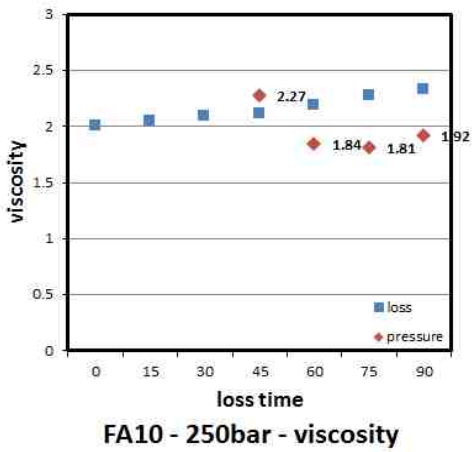
그림 3-2-1-23은 플라이 애쉬(FA) 10%를 사용한 모르타르의 가압 수준별 가압시간에 따른 점도를 가압하지 않고 경과 시간만 고려한 점도와 비교하여 정리한 것이다. 모든 가압 범위에서 가압시간 45분 후에 가압한 경우의 점도가 압력을 가하지 않은 경우와 비교하여 낮아지는 경향이 있다. FA의 경우 OPC와 유사한 점도 범위를 나타내고 있었으며, GGBF와 동시에 사용하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.



(a) 경과시간 및 가압 후의 점도 변화



(b) 경과시간 및 가압 후의 점도 변화



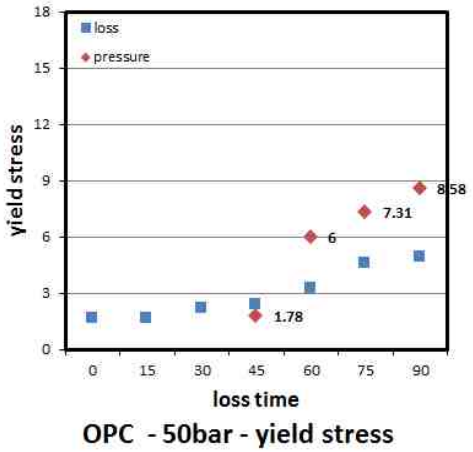
(c) 경과시간 및 가압 후의 점도 변화

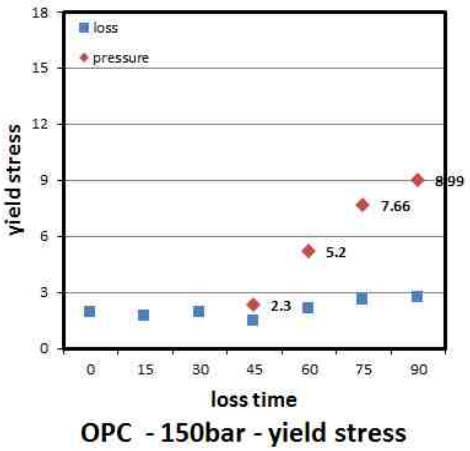
그림 3-2-1-23 가압 수준에 따른 경과시간 및 가압 후의 점도 변화

㈏ 항복값 특성

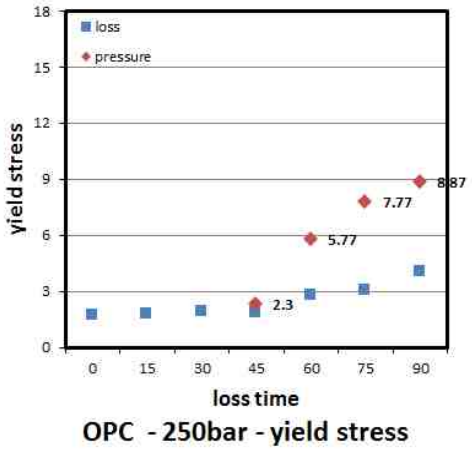
- OPC

그림 3-2-1-24는 보통포틀랜트 시멘트(OPC)를 사용한 모르타르의 가압 수준별 가압시간에 따른 항복값을 가압하지 않고 경과 시간만 고려한 항복값과 비교하여 정리한 것이다. 모든 가압 범위에서 가압시간 45분 후에 가압한 경우 항복값은 압력을 가하지 않은 경우와 비교하여 높아지는 경향이 있다.





(a) 경과시간 및 가압 후의 항복값 변화 (b) 경과시간 및 가압 후의 항복값 변화

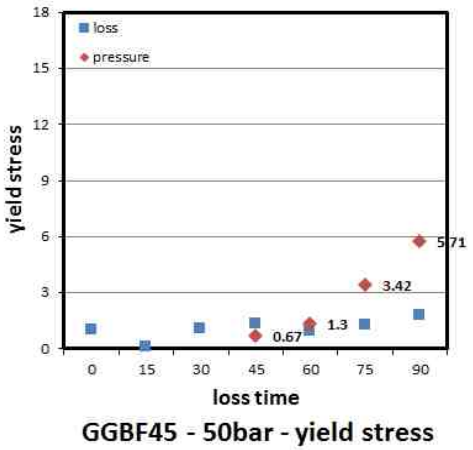


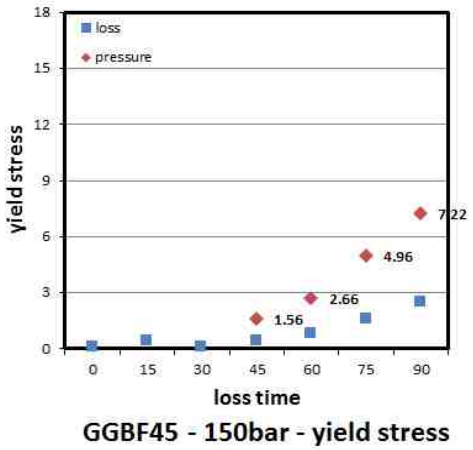
(c) 경과시간 및 가압 후의 항복값 변화

그림 3-2-1-24. 가압 수준에 따른 경과시간 및 가압 후의 항복값 변화

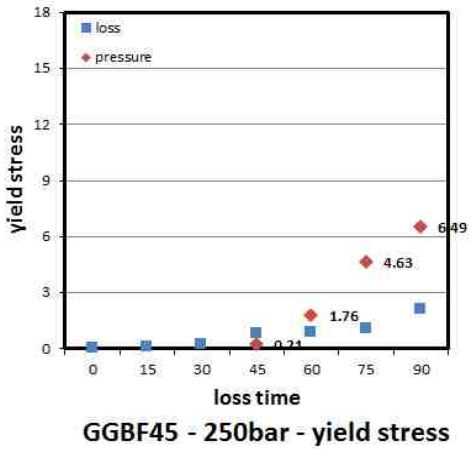
- GGBF 45

그림 3-2-1-25는 고로슬래그 미분말(GGBF) 45%를 사용한 모르타르의 가압 수준별 가압시간에 따른 항복값을 가압하지 않고 경과 시간만 고려한 항복값과 비교하여 정리한 것이다. 적용한 가압 범위에서 가압시간 45분 후에 가압한 경우 항복값은 압력을 가하지 않은 경우와 비교하여 낮아지며, 60분 후에는 높아지는 경향이 있다. GGBF 45% 혼합한 경우 유동성 향상 효과 및 낮은 점성 등으로 인하여 낮은 항복값 범위를 나타내고 있다.





(a) 경과시간 및 가압 후의 항복값 변화 (b) 경과시간 및 가압 후의 항복값 변화

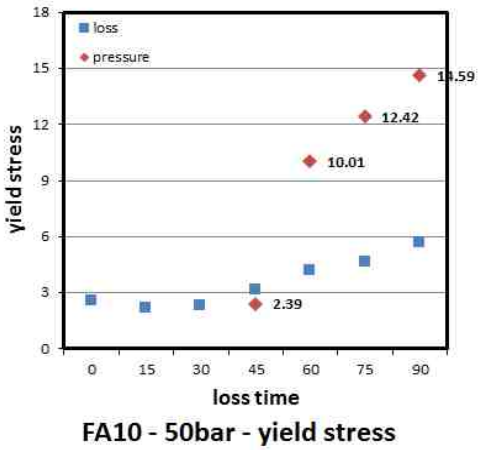


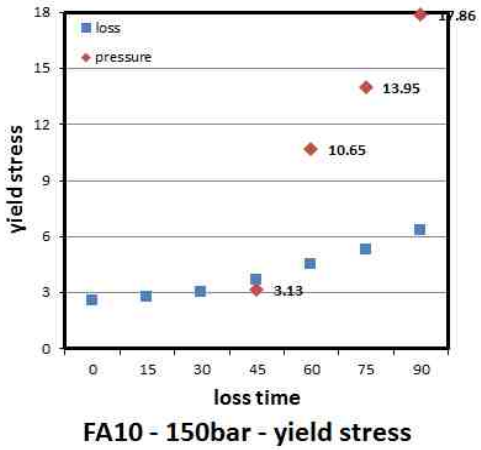
(c) 경과시간 및 가압 후의 항복값 변화

그림 3-2-1-25. 가압 수준에 따른 경과시간 및 가압 후의 항복값 변화

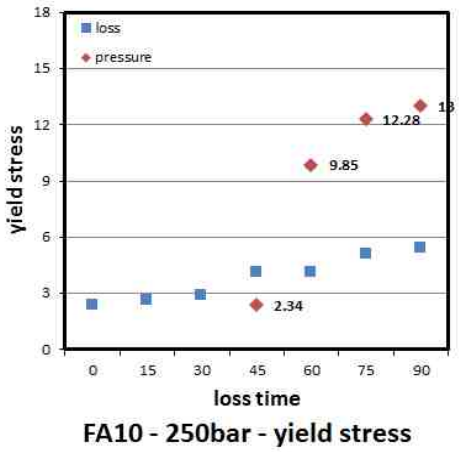
- FA 10

그림 3-2-1-26은 플라이 애쉬(FA) 10%를 사용한 모르타르의 가압 수준별 가압시간에 따른 항복값을 가압하지 않고 경과 시간만 고려한 항복값과 비교하여 정리한 것이다. 적용한 가압 범위에서 가압시간 45분 후에 가압한 경우 항복값은 압력을 가하지 않은 경우와 비교하여 낮아지며, 60분 후에는 높아지는 경향이 있다.





(a) 경과시간 및 가압 후의 항복값 변화 (b) 경과시간 및 가압 후의 항복값 변화

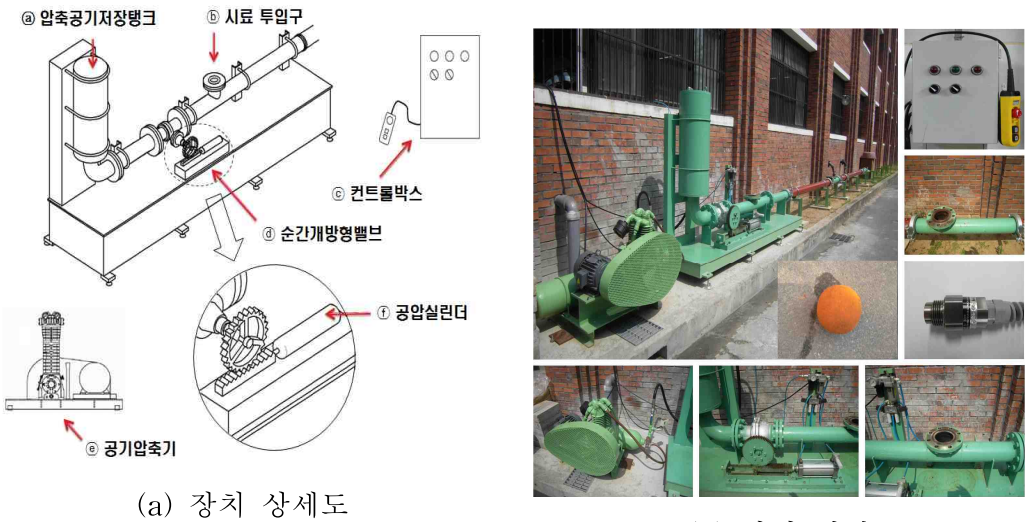


(c) 경과시간 및 가압 후의 항복값 변화

그림 3-2-1-26. 가압 수준에 따른 경과시간 및 가압 후의 항복값 변화

(나) 일정가압형에 의한 압송 전·후 물성 검토

고압송용 콘크리트를 펌프압송할 경우 일반콘크리트와 비교하여 점성이 크기 때문에 토출량이 커지면 압송관내 압력 손실이 증가하는 경향이 있다. 이러한 고유동 콘크리트의 펌프압송시 압송부하의 원인으로 사용재료 및 배합, 펌프의 기종 및 배관직경 등에 의한 것으로 보고되고 있으나, 본 연구 개발에서는 사용재료 및 배합에 관점을 두었으며 이에 따라 실험실 규모에서 고유동 콘크리트의 사용재료 및 배합에 따른 펌프 압송성을 정량적으로 검토 및 평가할 수 있는 간이압송장비를 고안하여 콘크리트의 배합을 검토하였다. 그림 3-2-1-27의 (a)는 개발된 장비의 상세도를 나타낸 것이다. 작동원리는 고압송용 콘크리트를 배관내 투입하고 공기압축기를 이용하여 저장탱크에 공압을 형성한 다음 순간개방형밸브를 작동하였을 때 저장되었던 공기가 배관을 따라 밀려 나오는 압력으로 고유동 콘크리트를 압송하는 원리이다. 개발된 장비는 20ℓ 이상의 고유동 콘크리트를 투입할 수 있으며, 최대압력 2.5MPa까지 공압을 저장할 수 있다. 또한, 지름 125mm의 배관을 사용하며, 압력센서 및 동적데이터로거를 통하여 요소별 배관압력을 측정할 수 있다. 그림 3-2-1-27의 (b)는 개발된 간이압송장치를 나타낸 것이다. 표 3-2-1-6은 일정가압형 간이압송장치 사양을 정리한 것이다.



(a) 장치 상세도

(b) 장치 전경

그림 3-2-1-27. 일정가압형 간이압송장치

표 3-2-1-6. 일정가압형 간이압송장치 사양

항 목	사 양
콘크리트 투입 용량	20 (ℓ) 이상
최대 압력	25 (bar)
배관 압력 측정	동적데이터로거 및 압력센서 8 (EA)
제어시스템	순간 개방형 밸브
배관길이 및 사이즈	30(m) 및 125A

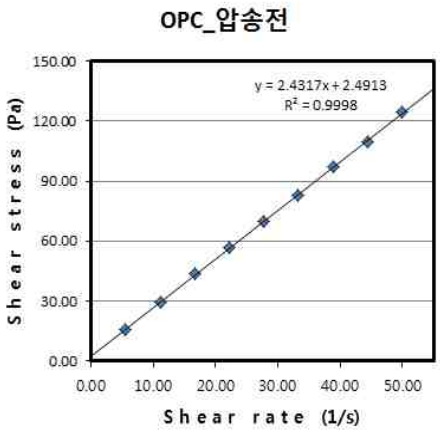
그림 3-2-1-28은 고안한 장비를 이용한 압송성능 평가 방법을 나타낸 것이다. 그림3-2-1-28과 같이 투입구를 통하여 배관내 고유동 콘크리트를 투입한 다음 압축공기저장탱크와 연결된 순간개방형밸브를 작동하여 연장 배관으로 고유동 콘크리트를 압송하게 된다. 이러한 방법으로 실제 펌프압송시 압송관내 고압송용 콘크리트의 유동을 재현할 수 있으며, 고유동 콘크리트의 사용 재료 및 배합에 따른 압송성능을 평가할 수 있다.



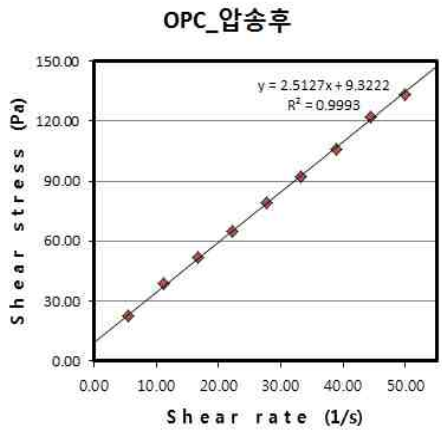
그림 3-2-1-28 일정가압형 간이압송장치 적용 실험 방법

① 사용 분체에 따른 압송 전·후의 점도 및 항복값

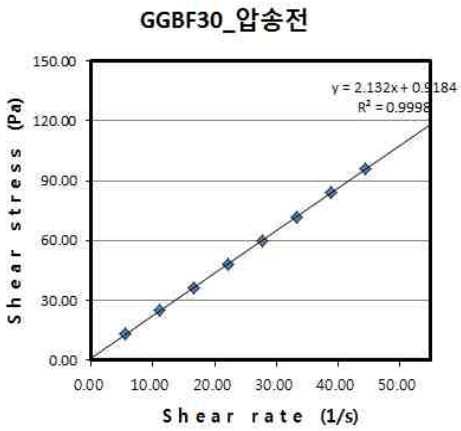
그림 3-2-1-29는 보통포틀랜트 시멘트(OPC), 고로슬래그 미분말(GGBF) 30%를 사용한 콘크리트를 압송한 다음 모르타르를 채취하여 압송 전·후의 점도 및 항복값을 정리한 것이다. 압송 전과 비교하여 압송후의 점도 및 항복값은 다소 증가하는 경향을 나타냈다.



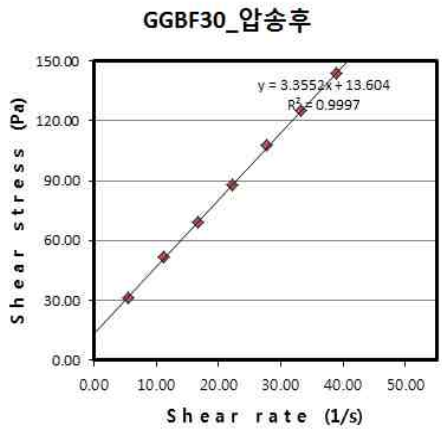
(a) 압송전 점도 및 항복값 (OPC)



(b) 간이압송 장치에 의한 압송후의 점도 및 항복값 (OPC)



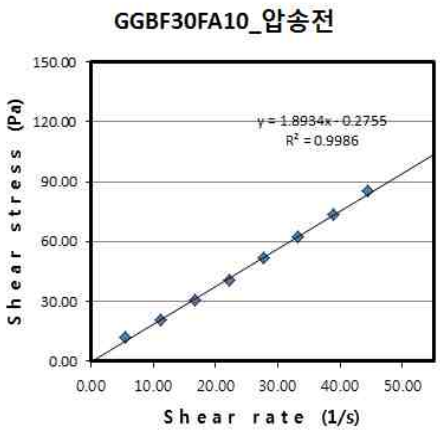
(c) 압송전 점도 및 항복값 (GGBF 30)



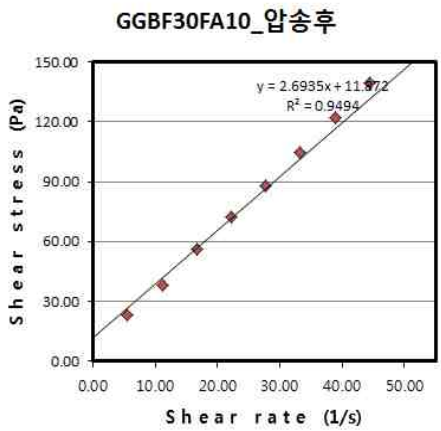
(d) 간이압송 장치에 의한 압송후의 점도 및 항복값 (GGBF 30)

그림 3-2-1-29. 일정가압형 간이압송 전·후의 점도 및 항복값

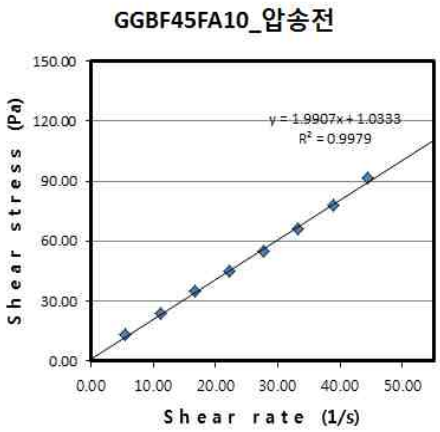
그림 3-2-1-30은 고로슬래그 미분말(GGBF), 플라이 애쉬(FA)를 사용한 3성분계 콘크리트를 압송한 다음 모르타르를 채취하여 압송 전·후의 점도 및 항복값을 정리한 것이다. 압송 전과 비교하여 압송후의 점도 및 항복값은 다소 증가하는 경향을 나타냈다.



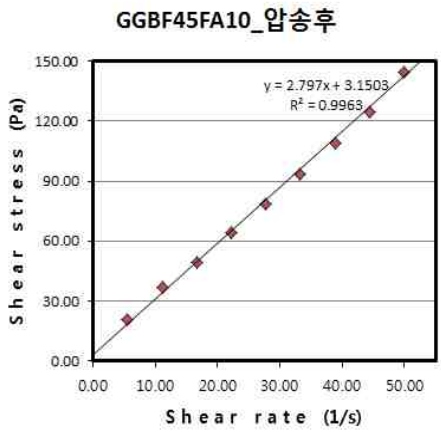
(a) 압송전 점도 및 항복값 (GGBF 30 FA 10)



(b) 간이압송 장치에 의한 압송후의 점도 및 항복값 (GGBF 30 FA 10)



(c) 압송전 점도 및 항복값 (GGBF 45 FA 10)



(d) 간이압송 장치에 의한 압송후의 점도 및 항복값 (GGBF 45 FA 10)

그림 3-2-1-30. 일정가압형 간이압송 전·후의 점도 및 항복값

(3) 콘크리트 특성을 고려한 CFD 활용 펌프 압송 높이 예측

펌프압송을 통한 콘크리트 타설시 사전 거동특성을 분석하기 위해, 현재까지는 다양한 프로젝트에서 현장과 동일한 조건을 모사하여, 실 타설 이전단계에서 수평배관시험을 수행하여 실제 현장의 시공 조건을 유추하게 된다. 하지만 이러한 수평배관시험은 고비용이 소요되면서도 이에 대한 표준화 된 규정이 없기 때문에 일회성의 결과로만 활용되는 한계를 가지고 있다. 아울러 개발된 고압송용 재료를 활용한 펌프 압송에 따른 배관내 거동특성은 일반 콘크리트의 타설 여건과는 상이하기 때문에 이에 대한 분석을 통해 실제 펌프압송 시공 상황에 대한 평가가 필요하다.

이에 대한 근본적인 해결방안을 찾고자 배관 내 콘크리트 펌프압송 기본 메크니즘을 분석하여 유동특성을 체계적인 평가방안을 모색해 보았다. 이를 위한 첫 번째 방법으로, 콘크리트 초기상태의 유동특성을 해석적으로 평가할 수 있는 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics)을 활용하여 그 특성을 분석하고 또한 분석된 결과를 바탕으로 실구조물(사업단 목표 400m 주탑 시공)을 대상으로 그 압송 성능을 예측/평가하였다. 그림 3-2-1-31은 CFD 해석 수행의 일반적인 절차도 이다.



그림 3-2-1-31. CFD 해석 과정

(가) 콘크리트 압송 메커니즘 도출

배관을 통과하는 콘크리트 유동특성은 일반적인 유체의 거동과 다른 특성을 나타낸다. 콘크리트는 다양한 입자들로 구성되어 있기 때문에 펌프장비에 의해 고압을 받으면 밀도차에 의해 배관 내 입도의 재분포가 일어난다. 이와 아울러 배관의 Wall effect에 의해 배관벽면 근처와 배관내부에서는 서로 다른 입도 구성을 나타낸다. 여기서 배관벽면 근처를 윤활층이라고 하고, (Browone, Bamforth, 1977), (Vasilev, 1953) 및 (Kaplan, 2005)은 그 두께를 1 ~ 5mm 사이라고 하였다. 또한

(Feys, 2005)는 콘크리트 종류에 따라 레올로지 값에 차이가 있고 이로 인해 윤활층의 두께 및 특성이 다르다고 하였다. 또한 (Jacobsen, 2009)와 (Rössig, 1974)은 토출량에 따라 윤활층이 형성되는 경향을 실험적으로 검증하였다. 여기서 윤활층의 기능이 강조되는 이유는 이러한 배관과 콘크리트사이의 윤활층에서 작용하는 전단이 전체배관에 작용하는 압력감소의 주요인이기 때문이다. 즉 윤활층의 특성이 콘크리트 펌프압송 유동특성을 결정하는 중요한 인자 가운데 하나라고 할 수 있다. 즉, 윤활층의 특성을 평가하는 것이 펌프압송 성능을 평가하는데 중요한 인자라고 할 수 있다. 이 가운데 윤활층을 배관벽면에서 어느 정도 깊이까지를 고려해야하는지가 중요하다. 이를 위해 CFD 해석을 통해 윤활층의 두께를 1 ~ 5 mm 범위에서 1 mm 간격으로 모델링을 달리하여 해석을 실시하였다. 그림 3-2-1-32의 해석결과를 보면 제시된 실험조건에서 윤활층의 두께가 약 2mm인 경우가 실험결과와 가장 유사한 결과를 나타내고 있다. 즉 본 실험조건에서 2mm 정도의 윤활층을 가지면서 콘크리트가 압송되는 것을 유추할 수 있다.

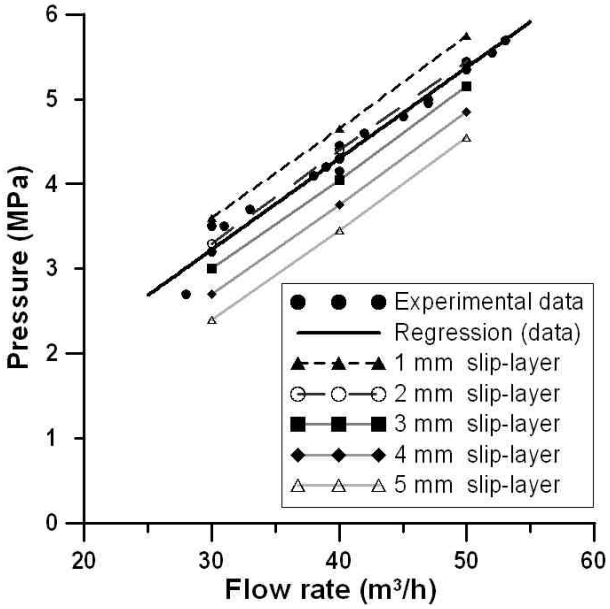


그림 3-2-1-32. 윤활층의 길이에 따른 토출량 별 압력 관계

다음으로, 이러한 윤활층을 구성하는 구성재료의 재료특성을 어떻게 평가하는지도 중요하다. 콘크리트는 굵은골재, 잔골재, 시멘트, 물, 기타 혼화제 등이 혼합된 복합재료이다. 이러한 콘크리트가 배관내에서 고압의 작용을 받으면 입자들의 상대

적인 이동이 발생된다. 실제 콘크리트의 경우 굵은골재들은 배관근처에서 내부방향으로 이동하려서 특성이 강하다. 이로 인해 윤활층은 잔골재 및 페이스트 재료들이 공존하는 모르타르 층으로 발달하게 된다. 이를 통해 윤활층을 구성하는 재료특성은 모르타르 물성으로 평가할 수 있고, 상대적으로 내부층은 콘크리트 재료특성으로 그 물성을 평가할 수 있다. 이들 각각의 물성에 대해서는 모르타르 점도계 및 콘크리트 점도계를 사용하여 레올로지 정수를 도출할 수 있었다.

윤활층의 두께 및 그 재료특성에 대한 실험적인 검증을 위해, 단면 속도 프로파일을 측정할 수 있는 Ultrasonic Velocity Profiler(UVP)를 사용하였다. UVP 계측결과 그림 3-2-1-33과 같이 본 연구에서 사용된 압송조건에서 해석적 결과와 거의 동일한 2 mm의 윤활층이 배관 표면부에 존재하는 것을 알 수 있었다. 아울러 이 윤활층을 구성하는 성분은 내부 콘크리트와는 다른 성질로, 측정되는 Shear rate 범위를 계산해서 보면 모르타르 층이라는 것을 알 수 있었다.

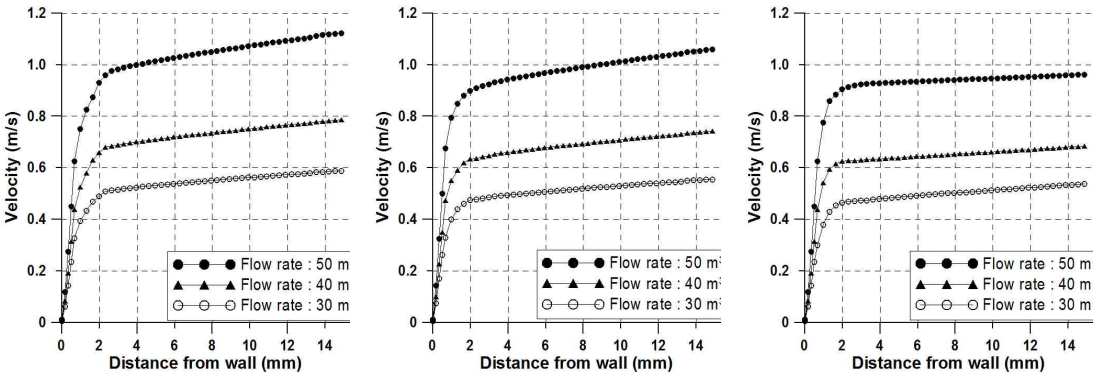


그림 3-2-1-33. 토출량 및 배합별 배관내 속도 프로파일

(나) 콘크리트 압송 재료모델 선정

레올로지 특성에 대한 다양한 연구를 통해 콘크리트는 일정수준 이상의 전단응력이 작용되어야만 변형이 일어나는 비 뉴턴 거동을 한다고 알려져 있다. 아울러, 전단응력(항복응력) 이후의 유동특성은 사용재료의 입도분포 및 모양 그리고 용적비에 따라 Shear-thinning 또는 Shear-thickening의 경향을 나타낸다고 보고되고 있다. 이는 전단변형률과 전단응력의 관계를 단순한 1차식의 관계로 나타내는 Bingham 모델(식 (3-2-1-7))보다는 콘크리트의 재료특성을 좀 더 엄밀하게 모사하

는 Herschel-Bulkly 모델(식 (3-2-1-8))로 적용함으로써 유동특성을 좀 더 명확하게 분석할 수 있다는 것이다.

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma} \qquad (3\text{-}2\text{-}1\text{-}7)$$

$$\tau = \tau_o + K\dot{\gamma}^n \qquad (3\text{-}2\text{-}1\text{-}8)$$

여기서, τ_0 : 항복응력, μ : 점성, $\dot{\gamma}$: 전단변형율,

K : Consistency index, n : Power law index

하지만 과연 펌프압송 상황에서도 동일한 조건이 만족되는지 검토하기 위해, 레올로지 테스트를 통해 도출된 각각의 변수를 이용하여 전산유체역학(CFD : Computational Fluid Dynamics) 해석을 실시하여, 토출량 별 소요압력을 실제 실험결과와 비교해본 결과 그림 3-2-1-34과 같이 결과 값에 큰 차이가 없다는 것을 알 수 있었다. 이는 실제 고압의 펌프압송 상황에서는 배관내 콘크리트 유동의 경우 콘크리트 재료의 Shear-thinning 또는 Shear-thickening 거동에 따른 영향보다는 윤활층의 특성에 의해 더 지배적인 영향을 받을 것을 예상할 수 있었다.

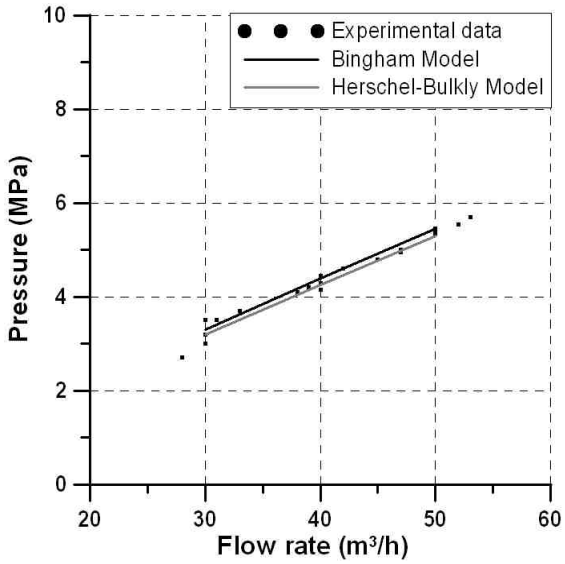
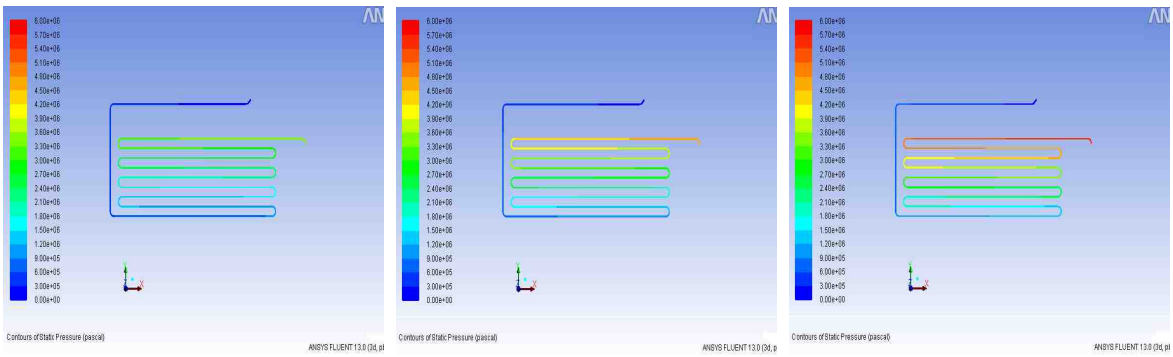


그림 3-2-1-34. 레올로지 모델에 따른
토출량 별 압력분포

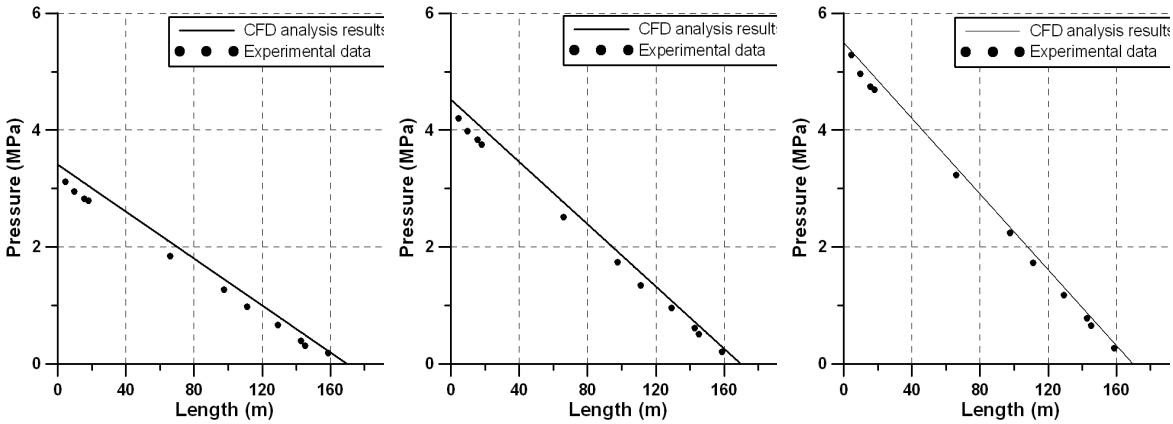
(다) Semi-scale test 대상 CFD 해석 결과

콘크리트 메커니즘 분석결과를 바탕으로 수평 170m에 대한 Semi-scale test CFD해석을 수행하였다. 그림 3-2-1-35은 모델링에 대한 토출량별 배관에 작용하는 압력분포 해석결과이다. 이를 실제 test 계측결과와 비교한 결과 그림 3-2-1-36과 같이 실험결과와 거의 유사한 압력분포 경향을 예측할 수 있었다. 이를 통해 윤활층의 펌프압송 메커니즘 분석에서부터, 이를 구성하는 구성재료에 대한 레올로지 평가 및 이를 적용하기 위한 레올로지 모델에 까지 배관내 콘크리트 펌프압송 예측을 위한 다양한 분석기법들의 타당성을 확인할 수 있었다.



(a) Flow rate : 30 m^3 (b) Flow rate : 40 m^3 (c) Flow rate : 50 m^3

그림 3-2-1-35. CFD 해석 결과(압력 Contour)

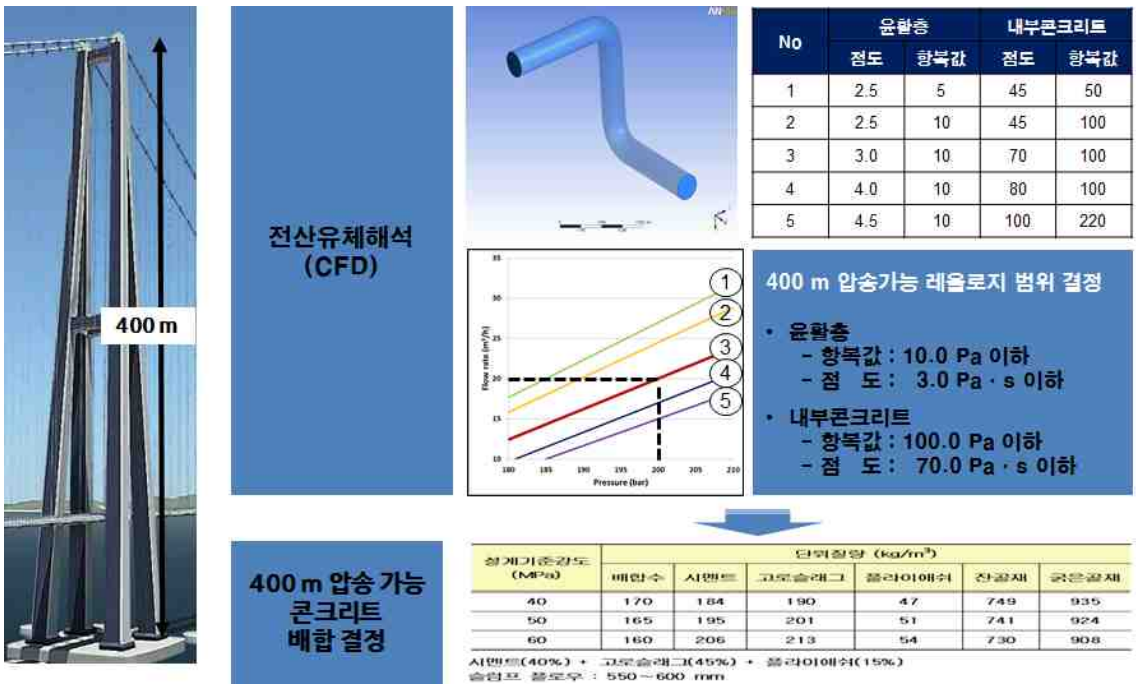


(a) Flow rate : 30 m^3 (b) Flow rate : 40 m^3 (c) Flow rate : 50 m^3

그림 3-2-1-36. 단상 유동해석 결과와 실험결과 비교

(라) 사업단 Test Bed 대상 CFD 해석 결과

본 CFD 해석을 활용한 최종 분석대상으로, 실제 사업단에서 목표로 하는 수직 400m 시공성능 예측을 실시하였고, 이를 위한 콘크리트 배합의 레올로지 범위를 도출해 보았다. 해석조건은 펌프압력 200 bar의 장비사양으로 간주하고, 최소 토출량 20 m^3/h 이상을 만족하는 400m 압송가능한 콘크리트 레올로지 평가결과, 윤활층의 경우 점도 3.0 Pa·s 이하, 항복값은 10 Pa 이하, 콘크리트의 경우 점도 70 Pa·s 이하, 항복값은 100 Pa 이하의 조건을 만족하는 경우 목표로 하는 시공조건을 만족할 수 있는 것으로 나왔다. 이를 만족하는 3가지 설계기준강도별 배합조건을 그림 3-2-1-37과 같이 도출할 수 있었다.



No	윤활층		내부콘크리트	
	점도	항복값	점도	항복값
1	2.5	5	45	50
2	2.5	10	45	100
3	3.0	10	70	100
4	4.0	10	80	100
5	4.5	10	100	220

설계기준강도 (MPa)	단위질량 (Kg/m³)					
	배합수	시멘트	고로슬래그	플라이애쉬	잔골재	굵은골재
40	170	184	190	47	749	935
50	165	195	201	51	741	924
60	160	206	213	54	730	908

시멘트(40%) + 고로슬래그(45%) + 플라이애쉬(15%)
슬럼프 플로우 : 550 ~ 600 mm

그림 3-2-1-37. CFD를 활용한 400 m 압송을 위한 배합결정

(마) CFD 해석 추가 수행 결과

지금까지의 분석결과와 더불어, 콘크리트 물성변화 및 계절에 따른 현장여건을 반영하기 위해 추가적인 검토를 진행하였다.

① 배관 이송거리에 따른 항복응력 변화를 고려한 해석

실제 콘크리트는 배관을 통과함에 따라, 즉 시간이 지남에 따라 콘크리트의 물성

이 변화된다. CFD를 통해 이러한 변화 현상을 고려하기 위해, UDF(User Defined Function)를 사용하여 물성변화 경향을 거리의 함수로 모델링 하였다. 그림 3-2-1-38은 물성변화 경향을 거리의 함수로 모델링한 UDF를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대한 출구 단면에서의 속도 분포를 비교하였다. 본 연구에서 개발한 UDF를 고려하였을 때, 벽면에서의 속도 구배는 더 커지고 채널 중심(Core) 부분의 속도 크기는 더 작아지고 평평해지는 것을 볼 수 있다. 그림 3-2-1-39는 UDF를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대해 채널 내부의 압력 분포를 비교한 결과이다. 두 조건에 대하여 출구에서의 압력은 대기압 조건으로 0이며, 입구에서의 압력은 UDF를 고려하였을 때 부하가 더 많이 걸리는 것을 알 수 있었다. 이를 통해 실제 콘크리트의 배관내 유동특성을 분석하기 위해서는 콘크리트 압송에 따른 물성변화를 고려한 예측이 필요함을 알 수 있었다.

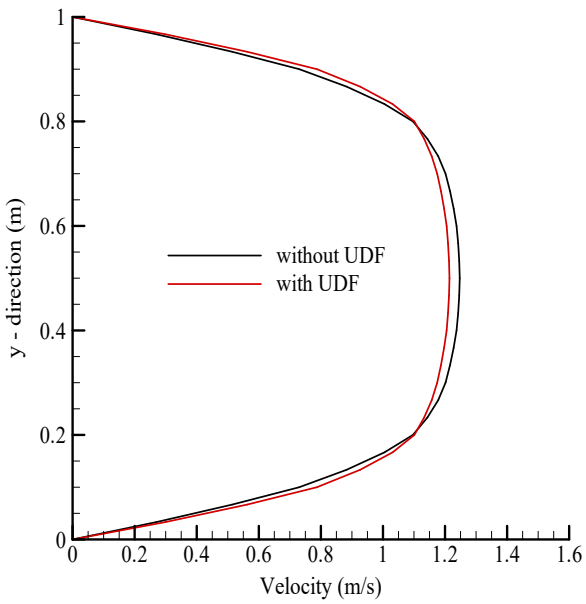


그림 3-2-1-38. 채널 출구 단면에서의 속도 분포 비교

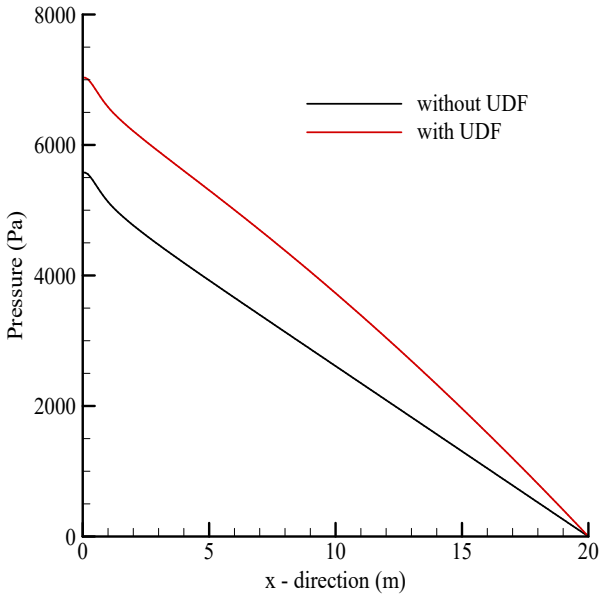


그림 3-2-1-39. 채널 내부의 압력 분포 비교

② 배관 온도를 고려한 콘크리트 압송

레올로지는 온도에 의존적인 경향을 보인다. 즉, 윤활층과 내부층을 구성하는 물성을 평가할 때 온도에 대한 고려가 필요하다는 것을 알 수 있다. 이에 콘크리트가 타설되는 외기조건에 따라 펌프압송 성능이 달라질 것을 예상 할 수 있다. 본 연구에서는 배관의 온도에 따라 콘크리트의 물성이 변화되는 현상을 고려하기 위해, UDF를 사용하여 Plastic viscosity를 온도의 함수로 모델링 하였다. 표 3-2-1-7은 본 연구의 계산 조건을 나타낸다. Case 3은 온도를 고려할 경우에 대한 UDF(배관 온도와 콘크리트 온도가 같음) 코드의 검증을 하기 위해 해석을 수행하였다. 그리고 Case 4와 Case 5는 각각 겨울과 여름의 온도 조건을 적용하기 위해 외기와 접하는 배관의 온도를 10도와 30도를 주어 계산을 수행 하였다. 표 3-2-1-8은 배관 온도에 따른 입구 부하 압력을 비교한 결과이다.

표 3-2-1-7. 배관 온도를 고려한 콘크리트 압송 문제의 계산 조건

No	UDF 사용 유, 무	콘크리트 초기온도(℃)	배관 온도(℃)
Case 3	O	20	20
Case 4	O	20	10(겨울)
Case 5	O	20	30(여름)

표 3-2-1-8. 배관 온도를 고려한 콘크리트 압송 문제의 입구 부하 압력 비교

No	콘크리트 초기온도(℃)	배관 온도(℃)	입구 부하 압력(Pa)
Case 3	20	20	56.6
Case 4	20	10(겨울)	70.2
Case 5	20	30(여름)	71.6

Case 4(겨울)와 Case 5(여름)의 조건에서는 콘크리트 초기 온도와 배관 온도가 동일한 Case 3보다 입구 부하 압력이 각각 13.6bar, 15.0bar 만큼 더 큰 것을 알 수 있다. 그림 3-2-1-40은 3가지 경우에 대해 출구에서의 속도 분포를 비교한 결과이다. Case 4와 Case 5는 Case 3보다 입구 부하 압력이 커지면서 출구에서의 속도가 증가하는 것을 볼 수 있다.

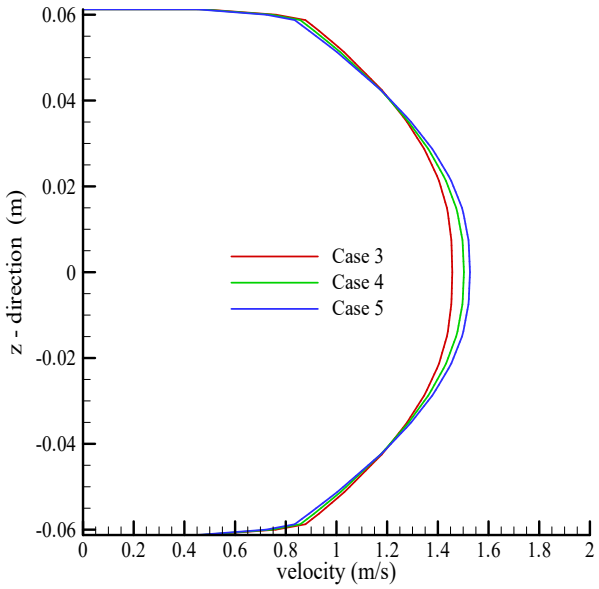


그림 3-2-1-40. 출구에서의 속도 분포 비교

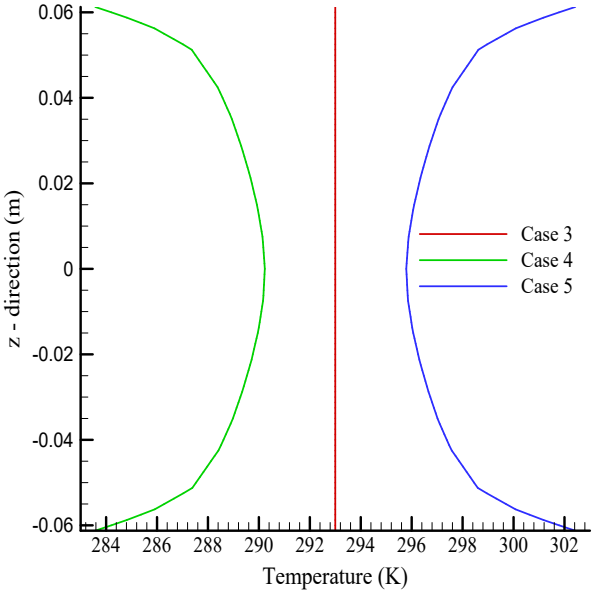


그림 3-2-1-41. 출구에서의 온도 분포 비교

그림 3-2-1-41은 3가지 경우에 대해서 출구에서의 온도 분포를 비교한 결과이다. Case 3의 경우에는 콘크리트의 온도와 배관의 온도가 같기 때문에 일정한 온도 분포를 가진다. Case 4의 경우에는 배관의 온도가 낮고 콘크리트의 온도가 상대적으로 높기 때문에 배관 벽에서는 온도가 낮고 배관 중심으로 갈수록 온도가 상승하는 것을 볼 수 있다. Case 5의 경우에는 배관의 온도가 높고 콘크리트의 온도가 상대적으로 낮기 때문에 배관 벽에서는 온도가 높고 배관 중심으로 갈수록 온도가 낮아지는 것을 볼 수 있다. 그림 3-2-1-42와 그림 3-2-1-43은 출구 부근에서 겨울과 여름의 배관 내 압력 분포이다. 배관 벽의 경계 온도 조건에 의해서 배관 중심으로 열이 전달되는 것을 볼 수 있다.

본 검토를 통해 실제 초장대교량의 주탑을 시공하는 과정에서 다양한 계절에 걸친 시공이 진행되기 때문에, 이러한 조건을 반영한 펌핑성능 예측을 통해 좀 더 정확한 시공성능 예측 및 평가가 가능할 것으로 사료된다.

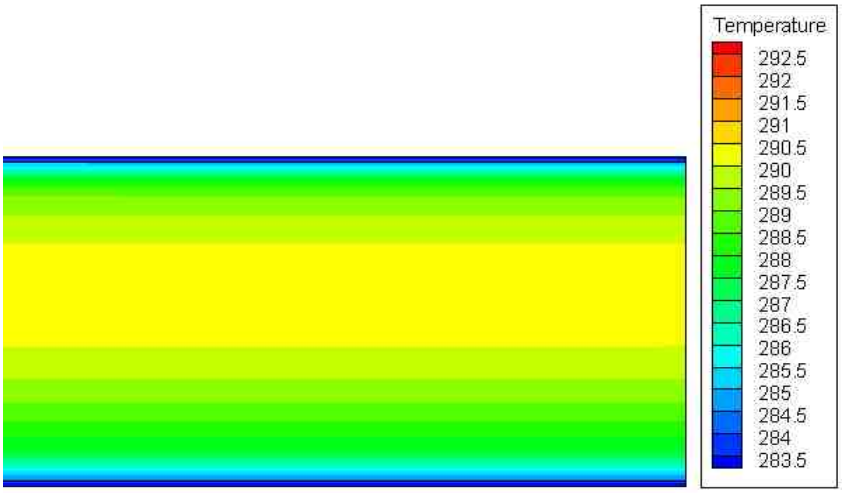


그림 3-2-1-42. 배관 내 출구 부근에서의 압력 분포 (겨울)

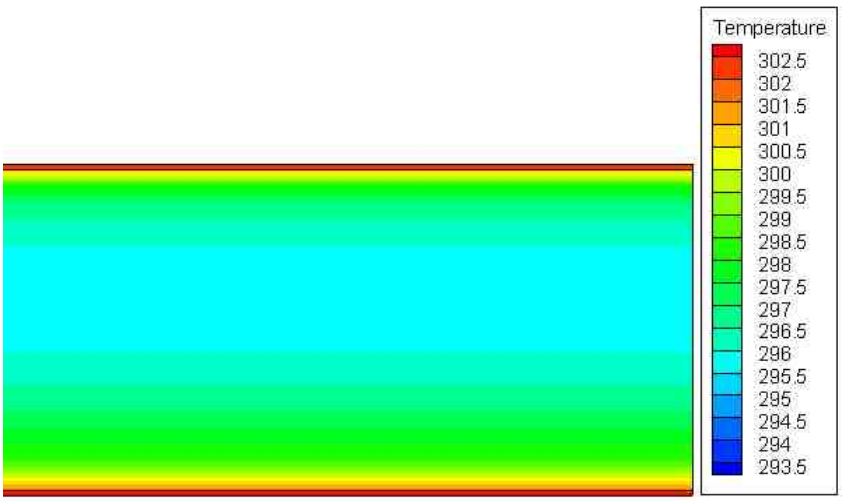


그림 3-2-1-43. 배관 내 출구 부근에서의 압력 분포 (여름)

(4) Semi-scale test 수행 및 상사성 분석

배관 내 콘크리트 유동 메커니즘을 분석하여 실 구조물의 펌프 압송 성능을 예측하고자 하는 CFD 해석적 기법과 아울러, 소규모 실험조건에서의 데이터를 분석해서 실 규모의 시공조건을 유추하는 상사성의 개념을 적용한 분석 기법을 위해, 수평 170 m의 semi-scale test 시험을 수행하였다. Semi-scale test 전체 전경 및 계측 상세 항목은 그림 3-2-1-44과 같다.



그림 3-2-1-44. Semi-scale test 전체 전경 및 계측 상세

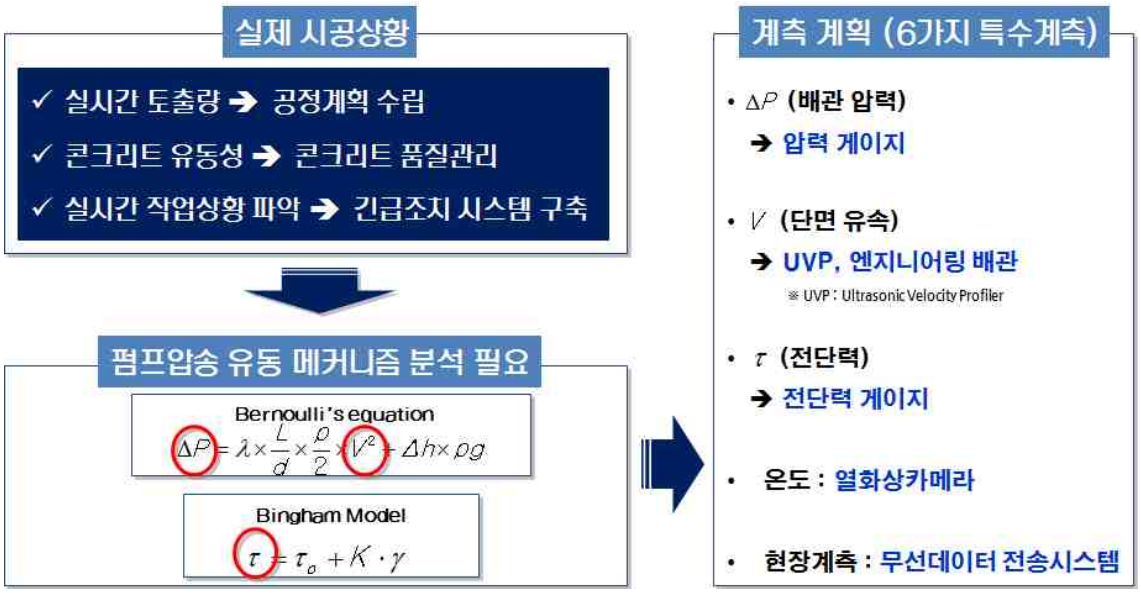


그림 3-2-1-45. Semi-scale test 전체 전경 및 계측 상세

도입된 6가지 특수계측에 대한 계측항목 및 평가 방법을 그림 3-2-1-45에 나타내었다. 배관 길이별 압력 경향을 분석하고 CFD 해석결과와 비교분석을 통한 예측 시스템의 검증을 위해 총 11개소에 압력게이지를 설치하였고, 정확한 토출량 계

산 및 실시간 유동 상황을 확인하기 위해 UVP 및 이를 적용하기 위한 엔지니어링 배관을 설치하였다. 아울러 콘크리트와 배관 사이의 마찰정도를 평가하기 위해 전단력 게이지를 설치하였다. 이상의 계측 및 실험조건으로 다양한 사전 실내 레올로지 테스트 결과를 통해 도출한 배합조건을 반영한 Semi-scale test 실험 계획 수립을 위해, 그림 3-2-1-46과 같이 6가지 인자를 고려한 최종 실험변수를 설정하였다.

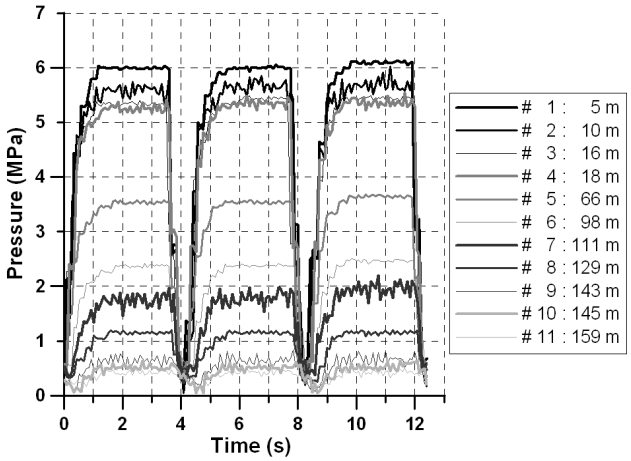


그림 3-2-1-46. 실험계획 수립을 위한 요소

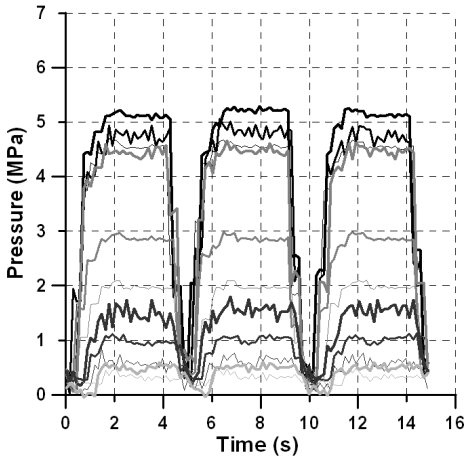
이를 통해 강도별, 혼화제 별, 굵은골대최대치수 별로 배합조합을 달리하여 실험을 실시하였다. 실험계획을 통해 도출된 최종 배합구성이 표 3-2-1-9와 같다. 이중 대표적인 압력파형 계측결과는 그림 3-2-1-47과 같다.

표 3-2-1-9. 최종 배합구성

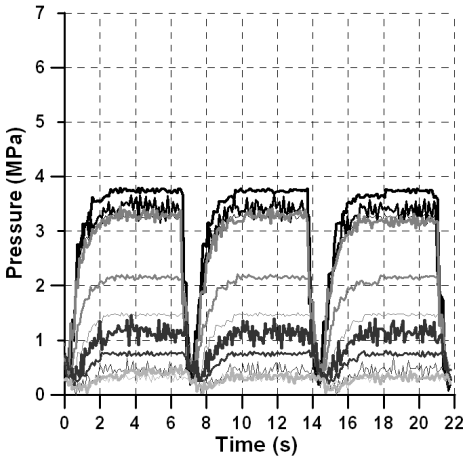
No	G_{max}	MPa	배합 구성
1	25	40	OPC
2	25	40	OPC+고로슬래그
3	25	50	OPC+고로슬래그
4	25	50	OPC
5	25	50	OPC+고로슬래+플라이애쉬
6	25	50	OPC+플라이애쉬
7	25	60	OPC+고로슬래그
8	25	60	OPC
9	25	60	OPC+고로슬래+플라이애쉬
10	25	60	OPC+플라이애쉬
11	25	40	OPC+고로슬래+플라이애쉬
12	25	40	OPC+플라이애쉬
13	20	40	OPC+고로슬래+플라이애쉬
14	20	50	OPC+고로슬래+플라이애쉬
15	20	60	OPC+고로슬래+플라이애쉬
16	25	40	OPC+고로슬래+플라이애쉬+실리카흄
17	25	50	OPC+고로슬래+플라이애쉬+실리카흄
18	25	60	OPC+고로슬래+플라이애쉬+실리카흄
19	25	40	OPC+고로슬래+플라이애쉬+LSP
20	25	50	OPC+고로슬래+플라이애쉬+LSP
21	25	60	OPC+고로슬래+플라이애쉬+LSP



(a) 토출량 : 50 m^3/h



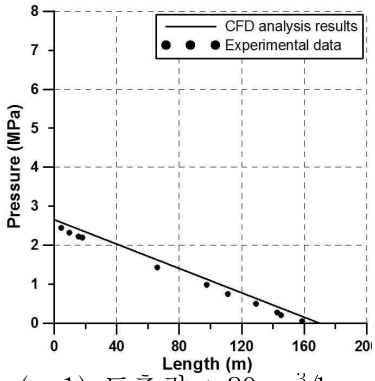
(b) 토출량 : 40 m^3/h



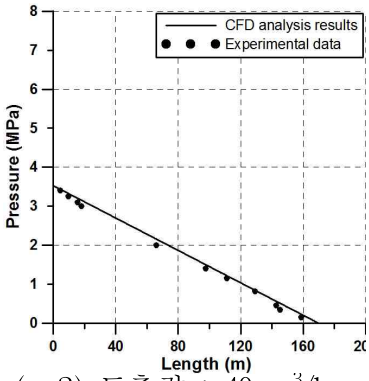
(c) 토출량 : 30 m^3/h

그림 3-2-1-47. 50 MPa 조건에서 토출량 별 압력파형

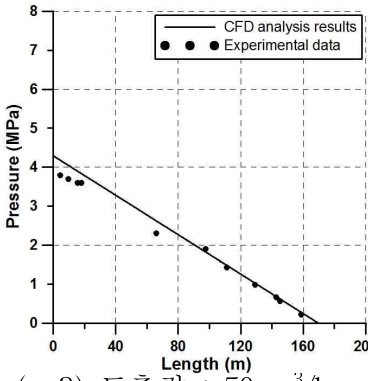
계측된 11개 위치에서의 압력파형을 평균한 값을 CFD 해석결과와 비교한 결과 그림 3-2-1-48과 같다. 3가지 강도 종류 및 토출량 별 배관길이에 따른 압력분포 특성을 해석결과와 비교한 결과 거의 유사한 결과를 나타냄을 알 수 있었다. 이는 CFD 해석을 위해 분석된 배관내 펌프 압송 메커니즘과 입력변수들이 실제 콘크리트 펌프압송 거동을 모사하기에 충분한 조건인 것을 알 수 있다.



(a-1) 토출량 : 30 m^3/h

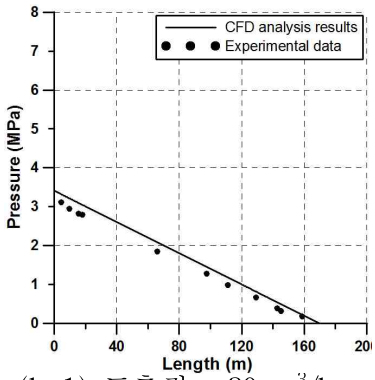


(a-2) 토출량 : 40 m^3/h

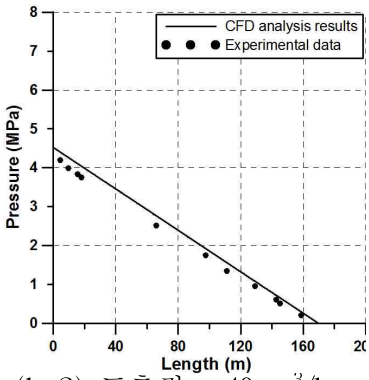


(a-3) 토출량 : 50 m^3/h

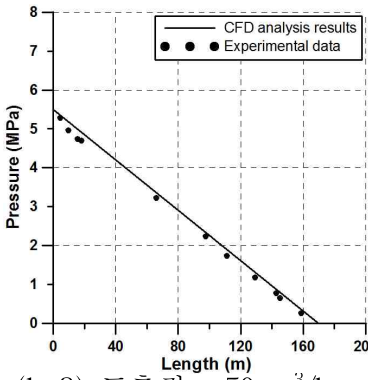
(a) 40 MPa



(b-1) 토출량 : 30 m^3/h

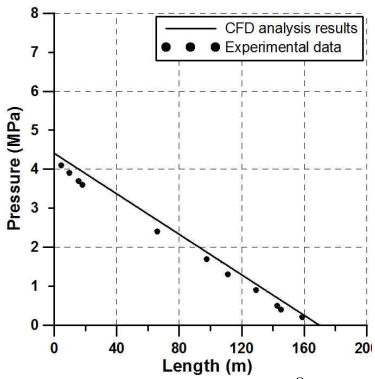


(b-2) 토출량 : 40 m^3/h

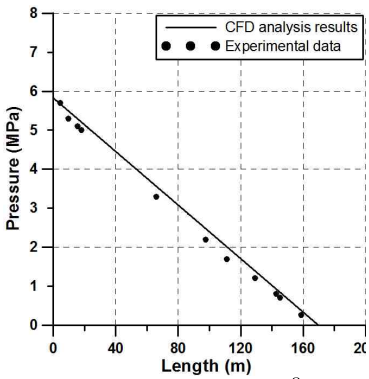


(b-3) 토출량 : 50 m^3/h

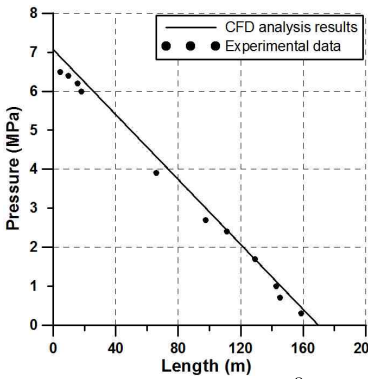
(b) 50 MPa



(c-1) 토출량 : 30 m^3/h



(c-2) 토출량 : 40 m^3/h



(c-3) 토출량 : 50 m^3/h

(c) 60 MPa

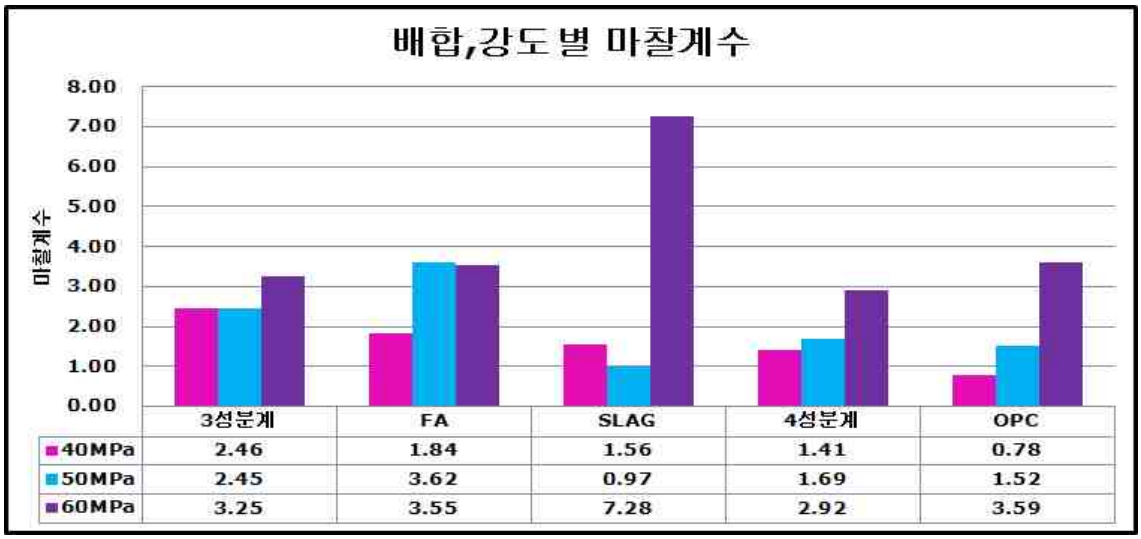
그림 3-2-1-48. Semi-scale test 결과와 CFD 해석결과 비교

표 3-2-1-9의 배합구성별 콘크리트 유동특성을 평가하기 위해 마찰계수 파라미터를 분석하였다. 콘크리트 마찰계수 산정을 위해서는 직접적인 압송 실험을 통해 마찰 유동을 일으키고, Fanning 방정식에 압력 강하량과 토출량을 대입하여 마찰

계수를 산정하는 것이 일반적인 방법이다. 이 때 사용되는 Fanning 방정식은 다음과 같다.

$$\Delta p = \lambda \times \frac{L}{d} \times \frac{\delta}{2} \times V^2 + \Delta h \times \delta \qquad (3\text{-}2\text{-}1\text{-}9)$$

여기서 마찰계수 λ를 산출하는 것이 실험의 목적이고, 이러한 마찰계수를 관리함으로써 현장에서 고유동 및 고강도 콘크리트 타설시 펌프카의 토출량 관리 및 압력 관리를 진행할 수 있다. 아울러, 본 연구에 사용된 실험 변수에 따른 즉 배합 조건별 마찰계수 값이 그림 3-2-1-49와 같다.



	3성분계	FA	SLAG	4성분계	OPC
40MPa	2.46	1.84	1.56	1.41	0.78
50MPa	2.45	3.62	0.97	1.69	1.52
60MPa	3.25	3.55	7.28	2.92	3.59

그림 3-2-1-49. 실험 변수 별 마찰계수

분석 결과 유동성은 40MPa OPC가 가장 유리하지만 40MPa의 경우 전반적인 물성변화 검토가 필요하고, 장거리 타설시 물성변화로 인한 영향 요인 감안이 필요하다는 것을 알 수 있었다. 아울러, 50MPa, 60MPa Slag는 물성변화가 매우 심하여 이를 적용시 세심한 주의가 필요한 것을 알 수 있었다. 이에 반해 3성분계와 4성분계는 비교적 안정적인 경향을 가지는 것을 알 수 있었다.

Semi-scale test의 계측 결과를 활용하여 실 구조물의 펌프압송 거동을 분석하기 위한 상사법칙 분석 개념도를 그림 3-2-1-50에 나타내었다.

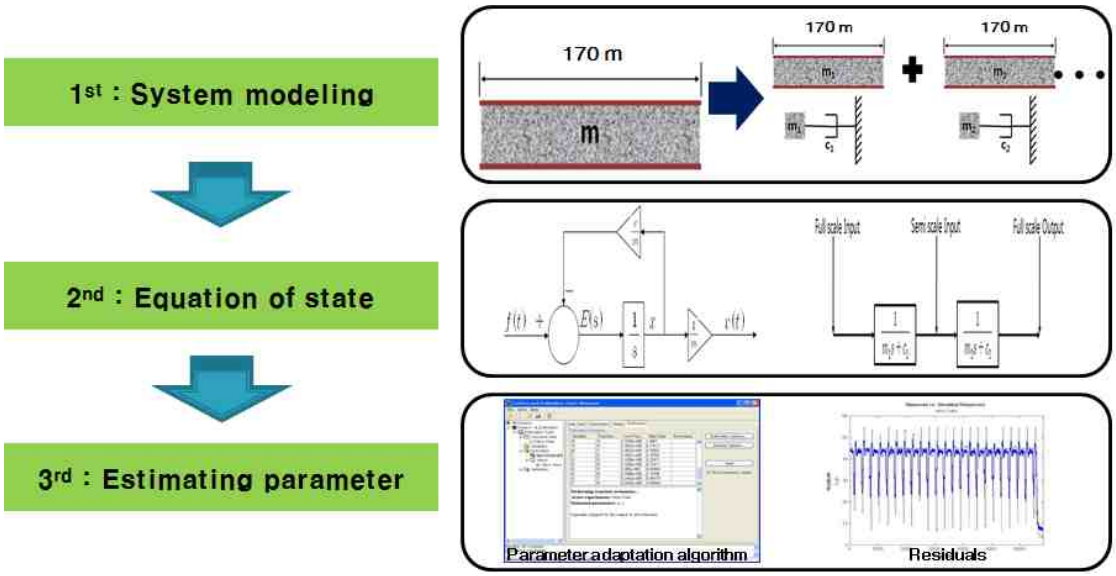


그림 3-2-1-50. 상사성을 이용한 결과분석 Flow

상사법칙에 대한 상세 분석 순서는 아래와 같다.

a. 실험데이터의 주파수 응답함수 추정

b. 주파수 응답함수의 Pole, Zero를 비교하여 시스템의 구조 결정

c. 지배방정식의 전달함수 모델링

d. 전달함수의 상태방정식화

e. Parameter estimation

f. 지배방정식을 통한 유속 추정

여기서, 중요한 사항으로 Parameter estimation 을 통해 추정된 Parameter 값을 지배방정식에 대입하여 지배방정식의 일반해를 구하여 속도의 시간이력을 생성하고, 생성된 속도 이력을 바탕으로 각각의 속도에서의 마찰계수를 구하면 다음 그림 3-2-1-51과 같이 마찰계수의 시간 이력데이터가 형성된다.

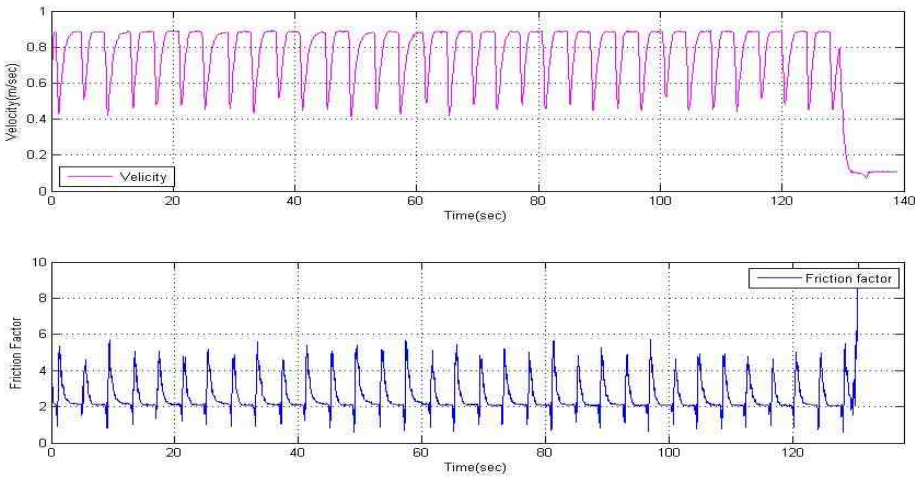


그림 3-2-1-51. 상사법칙을 이용한 속도 및 마찰계수의 시간 이력데이터

현재까지 도출된 CFD 및 상사성 분석 기법과 실제 계측결과를 비교하기 위해, A사의 1,200 m 수평배관실험을 대상으로 분석한 결과 그림 3-2-1-52과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 본 현장의 실험조건은 30 m^3/h 으로 CFD 해석 결과 약 4%, 상사성 분석 결과 약 6%의 오차내에서 토출량을 예측할 수 있는 것을 알 수 있었다. 이는 실제 구조물 거동 예측에서 아주 양호한 수준의 결과를 나타냄을 알 수 있다.

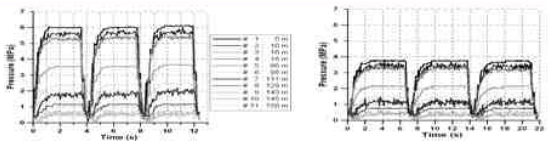
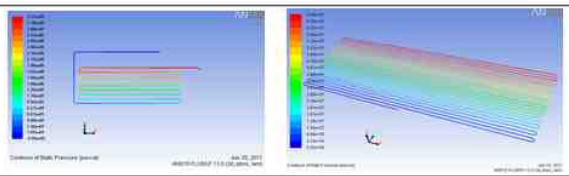
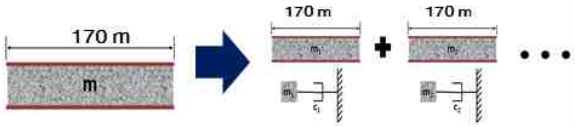
Analysis type	Flow rate (m^3/h)	Error (%)	Analyzed diagram
Measured	29.5	1	
CFD	28.7	4	
Dynamic similarity	31.8	6	

그림 3-2-1-52. Full-scale 비교/분석 결과

향후 본 사업단 연구추진과정에서 Full-scale의 펌프압송 테스트를 계획하여, 실제 계측 수행과 아울러, CFD 해석 및 상사성 분석 결과들과 상호 비교하여, 최종적으로 펌프압송 예측 시스템 구축을 통해 실 시공 이전단계에서 시공성능을 예측을 통해 최적의 시공방안 수립 및 평가가 가능하도록 지원할 예정이다.

(5) 펌프압송 Full-scale test

고주탑 시공용 고압송 콘크리트 개발 및 현장타설 기술 실용화 연구의 5차년도 주요 연구내용으로 4차년도 까지의 Semi-scale test 결과를 바탕으로 실제 400 m 주탑 시공 상황을 모사할 수 있는 1,000 m Full-scale test를 수행하였다.

(가)수직 400 m 시공 상황 모사 수평배관 길이 결정

수직 400 m 의 시공 상황을 모사할 수 있는 수평배관길이를 4차년도 까지 연구를 통해 완성된 CFD(Computational Fluid Dynamics) 해석을 통해 아래와 같이 도출하였다. 배관 길이별 압력 및 토출량 상황을 도출하여, 사업단 목표 성능기준을 적용하여 소요되는 압력 및 토출 량을 도출하고, 이를 만족하는 수평배관길이를 산출하였다. 산출결과 1,000 m 수평배관이 결정되었다.

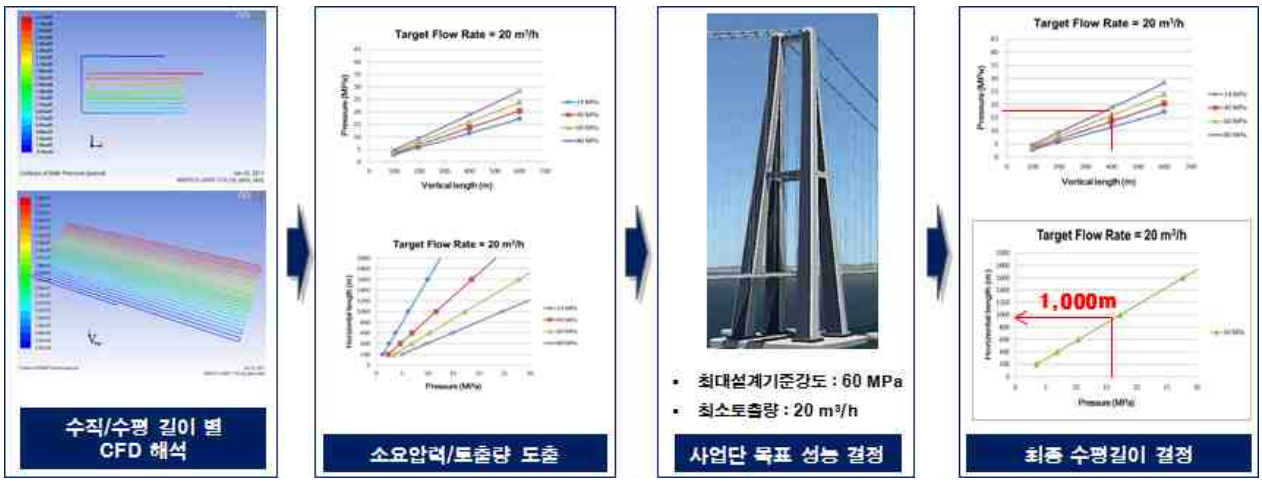


그림 3-2-1-53. 수평배관 길이 결정

(나) 1,000 m Full-scale test 전경

도출된 수평배관길이를 이용하여, 다양한 조건에서는 유동성능을 예측할 수 있도록 총 6가지의 특수계측이 적용되었고, 이를 실시간 분석하여 펌프압송의 상황을

상시 모니터링 할 수 있는 방식으로 test를 수행하였다. 아울러 실험결과들은 사전에 예측된 CFD 해석결과와 상호 분석을 통해 그 성능을 검증하였다.



그림 3-2-1-54. Full-scale test 전경

(다) 주요 특수계측 항목

① Ultrasonic Velocity Profiler

본 계측항목은 배관 단면 내 속도 프로파일을 초음파를 이용하여 직접 측정할 수 있는 장치로, 세계 최초로 본 연구내용에 적용되었다.

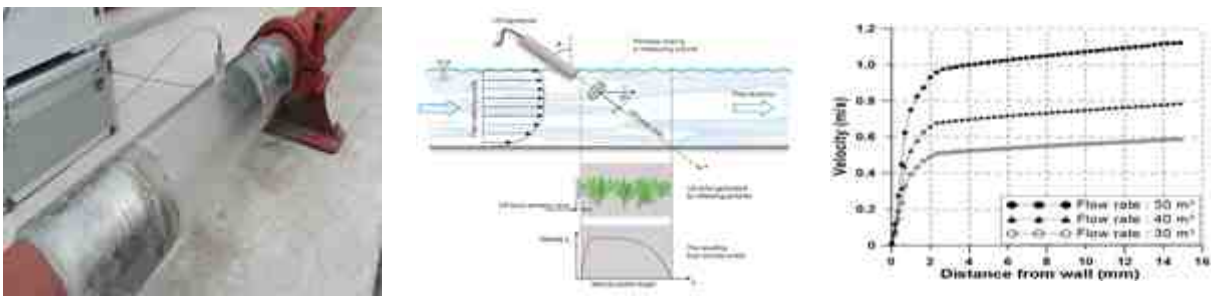


그림 3-2-1-55. UVP 적용 및 분석결과

② Fluid Liner

본 계측항목은 배관외부에서 전자기장을 유도하여, 콘크리트 내부 물 분자의 운동을 자극하여 윤활층의 형성을 활성하시켜 압송성능을 향상시키는 기술이다. 본 기술을 통해 약 30 % 의 효율이 나타난 다는 것을 확인 할 수 있었다.



그림 3-2-1-56. Fluid Liner 적용전경 및 주요 장치

(라) CFD를 통한 Full-scale test 예측

지금까지 수행된 Semi-scale test 결과를 이용하여 검증된, CFD 기법을 이용하여 1,000 m Full-scale test 결과를 예측해 보았다. 실제 실험결과와 비교분석 결과 실측값과 거의 90%이상의 정확도로 잘 예측이 된다는 것을 확인 할 수 있었다. 배관 전체 길이에 설치된 압력게이지 10개소에서의 압력 계측값과 CFD 해석결과의 각 위치에서의 압력 예측값의 비교결과 토출량에 따라 약간의 차이는 있지만 거의 잘 일치한다는 것을 확인할 수 있었고, 토출량의 경우도 잘 일치한다는 것을 알 수 있었다.

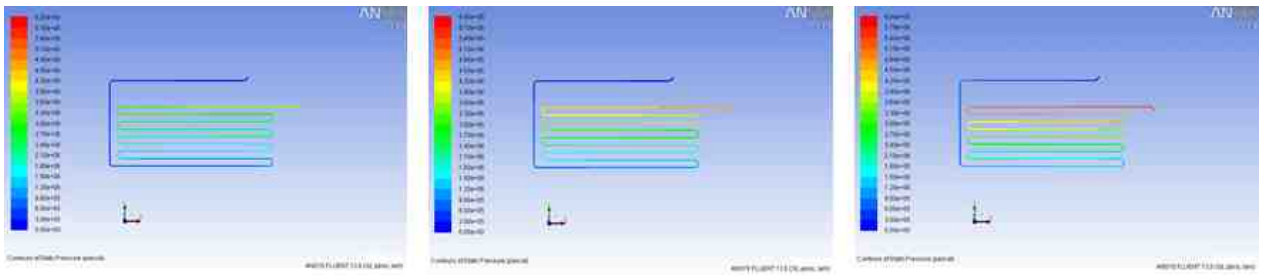


그림 3-2-1-57. CFD 해석결과

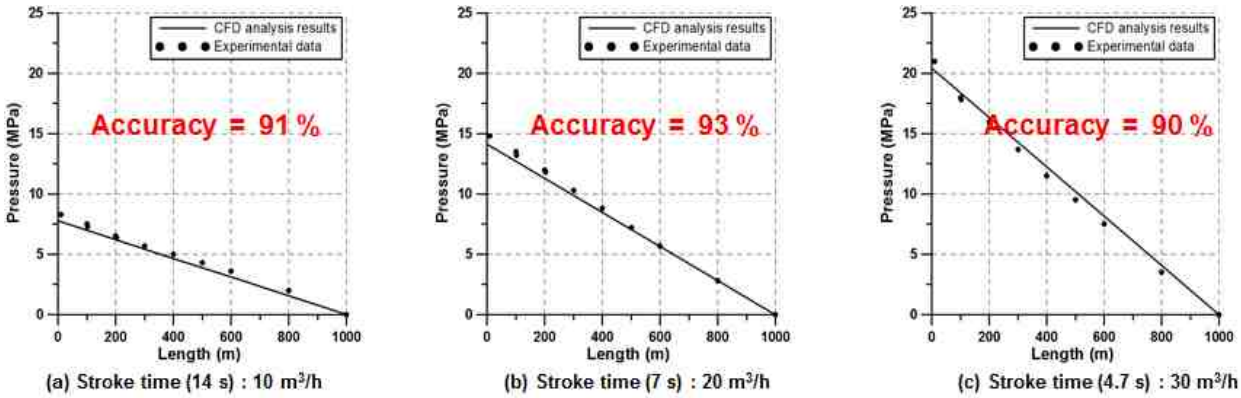


그림 3-2-1-58. 배관길이에 따른 압력값 비교결과

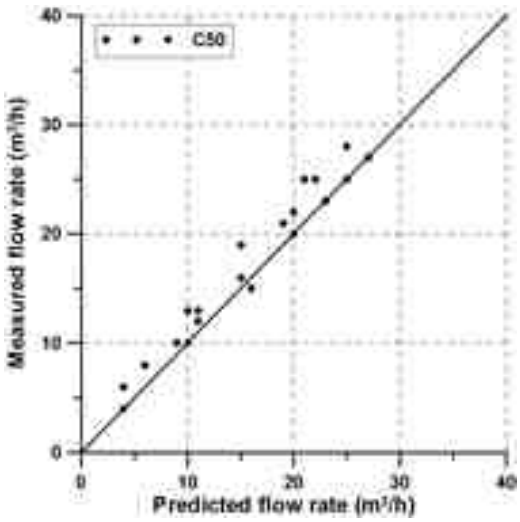


그림 3-2-1-59. 토출량 비교결과

(마) Full-scale test 예측Full-scale test 주요결과 분석

① 압송 길이별 압력

1,000 m 배관실험과 아울러, 200, 400, 600, 800 m 배관에 대한 압송실험을 병행해서 수행하였고 각 배관길이별 소요압력을 CFD 해석결과와 비교분석 결과 압송길이별로도 거의 정확한 압력상황을 예측할 수 있는 것을 확인 할 수 있었다. 아울러, 실제 도출된 압력값의 경우도, 최적의 혼화제 및 배합구성을 통해 도출한 콘크리트를 사용하여 저점도 고유동의 물성을 확보하였기 때문에 성능의 우수한 결과를 확인 할 수 있었다. 이러한 결과는 향후에 발주될 초장대교량의 고주탑의 시공과 아울러, 초고층 건물의 펌프압송 분야에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 판단할 수 있었다. 또한 CFD 예측 성능을 통해 사전에 그 압송성능을 평가하여 최적의 배합 및 재료구성을 할 수 있을 것으로 사료된다.

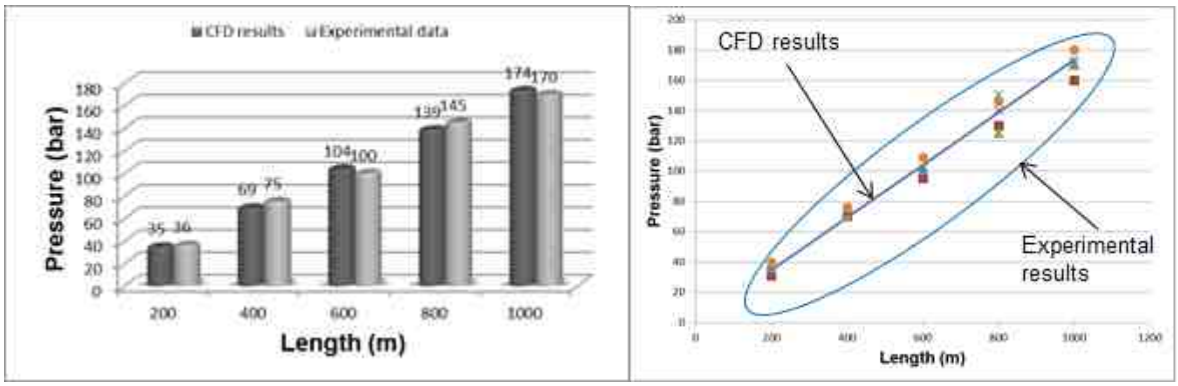


그림 3-2-1-60. 압송 길이별 압력값

② 굵은골재최대치수별 압력 상황

본 Full-scale test 수행 시, 기존의 다양한 굵은골재최대치수 별 압력상황을 비교분석하기 위해 대표적인 13 mm, 20 mm, 25 mm에 대해 배관 길이별 압력상황을 비교실험을 수행하였다. 계측결과 굵은골재최대치수에 따라 압송상황이 상당히 좌우된다는 것을 확인 할 수 있었다. 동일한 조건에서 13 mm 굵은골재최대치수를 사용한 콘크리트의 압송의 경우 25 mm 굵은골재최대치수를 사용한 콘크리트에 비해 최대 50 정도 압력이 덜 소요된다는 것을 확인 할 수 있었다. 이를 통해 압송성능을 개선시키기 위해 굵은골재최대치수의 조절에 따라 상당한 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다.

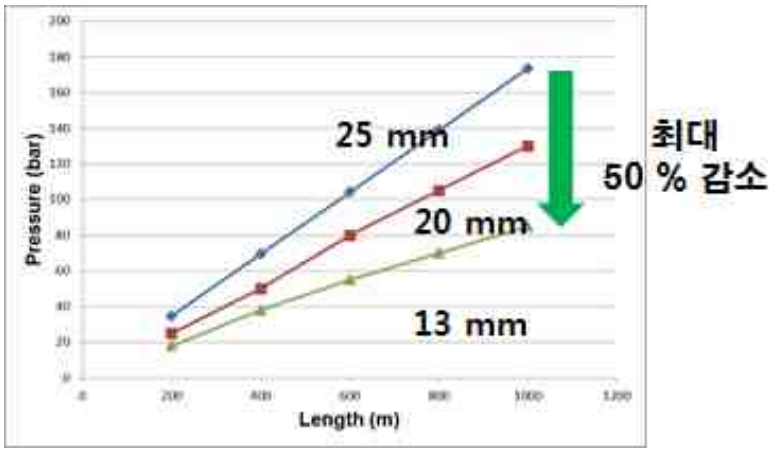


그림 3-2-1-61. 굵은골재최대치수별 압력값

(6) 실제 Project 적용

이상에서 도출된 Full-scale test의 결과 및 이를 통해 검증된 CFD의 해석기법을 가지고 실제 Project를 대상으로 그 성능을 평가해 보았다.



- Height : 156 m x 2 ea
- Strength : 50 MPa
- Min. flow rate : 30 m^3/h
- Pump : BSA2110HP-D

그림 3-2-1-62. 부산-거제 연결도로 사장교 압송 조건

첫 번째로, 기 시공 완료된 부산-거제 연결도로의 2주탑 사장교에 대해 그 성능을

예측해본 결과 실측값과 아주 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

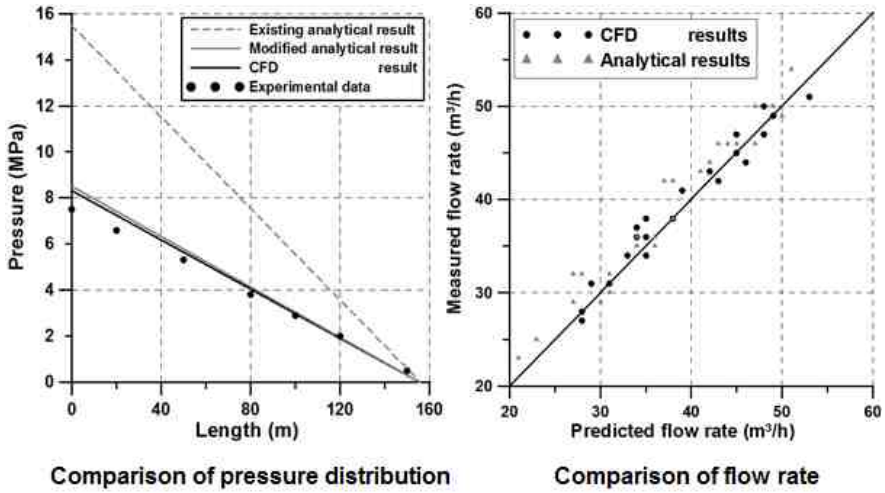


그림 3-2-1-63. 부산-거제 연결도로 사장교 성능평가 결과

두 번째로, 당 세부에서 Test Bed로 하고 있는 새천년대교에 대해서도 그 성능을 예측해본 결과 굵은골재최대치수 25mm 인 경우에도 10 MPa 이하의 소요압력 값이 도출되어, 저렴한 고압장비를 활용한 원가절감을 할 수 있는 결과가 도출되었다.

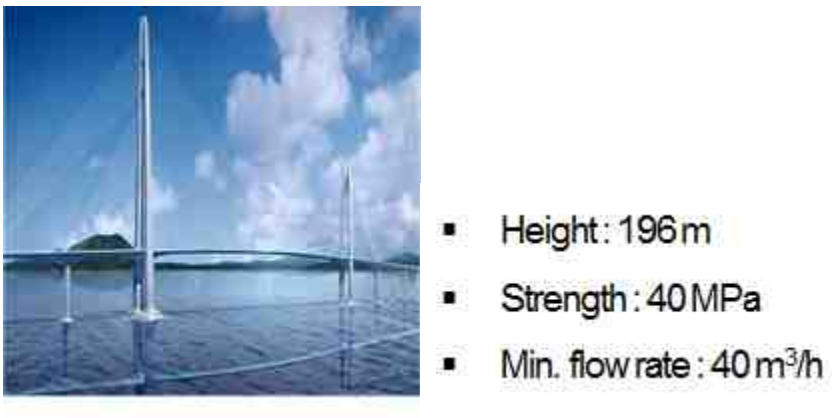


그림 3-2-1-64. 새천년대교 압송 조건

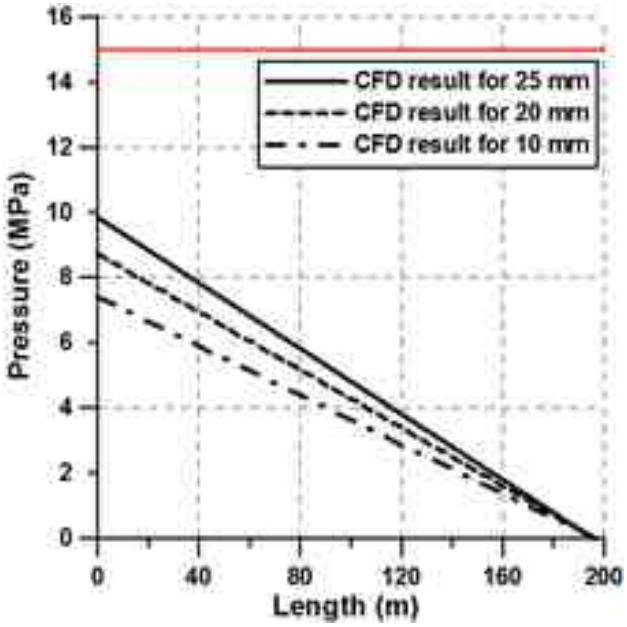


그림 3-2-1-65. 새천년대교 성능평가 결과

세번째로, 당 사업단의 Prototype에 대한 성능을 평가해본 결과 굵은골재최대치수에 따른 압력소요 조건들이 차이가 발생하지만, 현존하는 최고사양의 펌프장비를 활용할 경우, 시간당 타설량을 증대시켜 공기단축을 이룰 수 있고, 아울러, 고강도의 콘크리트 재료를 사용하더라고 충분한 압송이 된다는 것을 확인할 수 있었다. 아울러, 고압장비의 경제적인 활용을 위해서는 굵은골재최대치수를 최대한 줄임으로써 압송을 가능하다는 내용까지도 파악할 수 있었다. 이러한 결과를 바탕으로 실제 현장의 구조물 요구 성능 및 압송상황을 감안하여 최적의 시공조건을 결정해야 하겠다.



- Height : 400 m
- Strength : Max. 60 MPa
- Min. flow rate : 20 m^3/h

그림 3-2-1-66. 초장대교량사업단 주탑 압송 조건

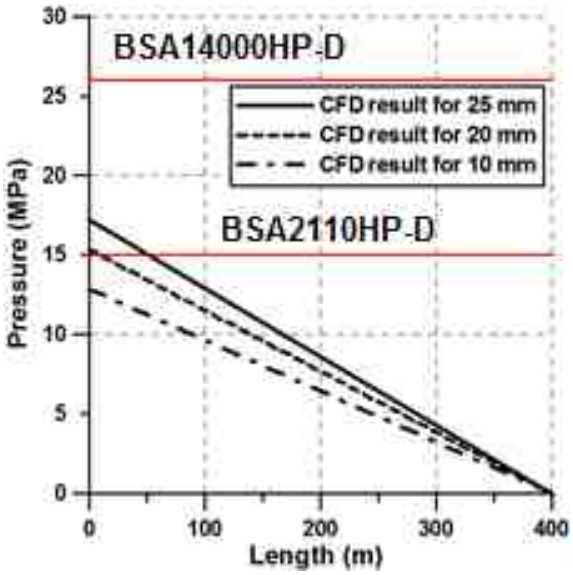


그림 3-2-1-67. 초장대교량사업단 주탑 성능 평가 결과

참고적으로 각 프로젝트에 대한 분석결과를 정리하면 다음과 같다.

표 3-2-1-10. 새천년대교/초장대교량사업단 Project 성능평가 결과

새천년대교	초장대교량사업단
▪ BSA2110HP-D (50,000,000/year save) ▪ Increase flow rate (Up to 60 m^3/h) ▪ Gmax : 25 mm	▪ BSA2110HP-D (10 mm) ▪ BSA14000HP-D (20, 25 mm) ▪ Increase flow rate (Up to 30 m^3/h) ▪ To use BSA2110HP-D, decrease strength (60MPa 50MPa)

나. 앵커리지 수화열 제어용 초저발열 콘크리트 개발 및 현장타설 기술 실용화

(1) 초저발열 결합재 개발

(가) 초저발열 결합재의 목표성능 설정

① 목표성능 : 미소수화열 35cal/g 이하

㉮ 초저발열 결합재의 미소수화열과 관련된 목표성능은 현존 최고성능인 40 cal/g을 능가하는 World best급인 35 cal/g으로 설정하였음.

(나) 초저발열 결합재의 개발

① 연구수행 내용

초장대교량의 앵커리지부 수화열 제어에 적용하기 위해 미소수화열 35cal/g 이하의 초저발열 결합재 개발에 목적이 있으며, 매스 콘크리트용 수화열 저감 방법으로 벨라이트계 저열 포틀랜드시멘트를 사용하고 고로슬래그(Granulated slag)나 플라이애쉬(Fly ash)와 같은 산업부산물을 일정 부분 치환하였다. β-C2S가 다량 함유된 벨라이트계 저열 포틀랜드시멘트에 고로슬래그, 플라이애쉬 등 치환율의 변화가 수화발열량, 압축강도 및 미세구조 등의 시멘트 페이스트 및 모르타르 물성에 미치는 영향을 비교 분석하였다.

혼화재로 사용되는 고로슬래그 미분말의 수화반응은 불규칙 유리구조로서 잠재 수경성과 동시에 포졸란 작용으로 물과 반응하는 성질을 가지고 있다. 배합수에 소량의 소석회, 수산화칼슘, 황산염 등 알칼리 자극성분이 존재하면, 고로슬래그 미분말에 수산화이온이 흡착하여 C-S-H계의 수화생성물이 생성되고 응결/경화하는 잠재 수경성을 나타낸다. 또한 플라이애쉬의 수화반응은 시멘트 수화시 생성되는 $Ca(OH)_2$과 플라이애쉬내 규산염, 알루네이트상 광물 등과 반응하여 칼슘실리케이트 및 칼슘알루미네이트 수화물이 생성되는 포졸란 반응을 일으키게 된다.

고로슬래그 미분말과 플라이애시와 벨라이트계 저열 포틀랜드시멘트를 혼입하여 초저발열 결합재의 광물 구성 변화에 따라 수화속도와 총 수화발열량은 결합재 종류에 따라 달라지게 되고, 각각의 결합재내 C_3S, C_2S, C_3A 및 C_4AF 등의 광물 중량비에 대한 최종수화열은 식 (3-2-1-11)으로 계산되며, 표 3-2-1-10은 시멘트의 주광물인 C_2S, C_3S, C_3A 및 C_4AF 등의 단위 g당 일반적인 수화열을 나타낸다.(Tennis 2000, Meinhard 2008)

$$H_{\gamma}(Cal/g) = 136(C_3S) + 62(C_2S) + 200(C_3A) + 30(C_4AF) \quad (3\text{-}2\text{-}1\text{-}10)$$

표 3-2-1-11. 시멘트 조성물별 미소수화열

Compound	Hydration heat	
	Joule/g	Cal./g
C_3S	502	120
C_2S	260	62
C_3A	867	207
C_4AF	419	100

본 연구에서는 매스 콘크리트 내 적용을 위한 저발열 콘크리트의 개발에 있어서 국내외 기술자료 분석을 통해 최근 선진 국가에서 교량 앵커지지부 등에 적용하고 있는 벨라이트계 저열 포틀랜드시멘트에 산업부산물을 혼입한 저발열 결합재 개발을 위해 적용한 실험 종류와 방법은 표 3-2-1-12와 같다. 표 3-2-1-13은 실험에 사용된 벨라이트 시멘트와 OPC의 C2S, C3S, C3A 및 C4AF 광물 조성 함량으로 수화발생량이 낮은 C2S가 벨라이트 시멘트의 대부분을 차지하고 있음을 보여준다. 벨라이트계 저발열 시멘트의 수화반응은 OPC 대비 C2S의 양의 증가와 C3S 및 C3A 양의 감소로 초기 수화발열량이 적으며, 장기적으로 수화가 진행되는 것으로 판단된다.(Zhang, 2002)

표 3-2-1-12. 실험개요

Experiments		condition of sample	Curing days	Remark
Heat of hydration	72 hours	cement paste powder	-	KS L 5121
	28 days			
Compressive & Bending strength		mortar specimen mould (40×40×160mm)	1, 3, 7, 28 and 91 days	KS L ISO 679
Micro structure	XRD	cement paste powder	0, 3, 7 and 28 days	Rigaku D/Max 2500/PC
	SEM	cement paste mould (10×10×10mm)	3, 7 and 28 days	JSM-6700F

표 3-2-1-13. 시멘트 종류별 화학조성비(%)

Type	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
OPC	55	19	10	7
Belite cement	28	49	6	12

벨라이트계 저열 포틀랜드시멘트와 플라이애쉬 및 고로슬래그를 혼입한 각각의 2성분계 및 3성분계 결합재 치환율 및 배합 종류는 표 3-2-1-14와 같다. 벨라이트계 저열 포틀랜드시멘트를 100% 사용한 것을 기본 플레인(P)으로 하고 2성분계 배합은 플라이애쉬와 고로슬래그를 각각 10~70% 중량 대비 7단계로 치환하였다. 또한 3성분계 배합은 고로슬래그 30% 치환율에 플라이애쉬 10~40% 중량 대비 4단계로 치환하였다. 재령별 수화열 분석외 미세구조 분석은 SEM, XRD 등의 분석장비로 시멘트 페이스트내 물리·화학적 특성 및 수화된 조직 변화를 비교하였다.

표 3-2-1-14. 배합별 결합재 조성 정보

Mix Design		mark*	binder (%)		
			Base	Fly ash	Slag
Plain(Belite cement)		P	100	-	-
Ternary blended binders					
	10% Fly ash+30% Slag	1F3S	60	10	30
	20% Fly ash+30% Slag	2F3S	50	20	30
	30% Fly ash+30% Slag	3F3S	40	30	30
	40% Fly ash+30% Slag	4F3S	30	40	30
Binary blended binders					
	10% Slag	1S	90	-	10
	20% Slag	2S	80	-	20
	30% Slag	3S	70	-	30
	40% Slag	4S	60	-	40
	50% Slag	5S	50	-	50
	60% Slag	6S	40	-	60
	70% Slag	7S	30	-	70
	10% Fly ash	1F	90	10	-
	20% Fly ash	2F	80	20	-
	30% Fly ash	3F	70	30	-
	40% Fly ash	4F	60	40	-
	50% Fly ash	5F	50	50	-
	60% Fly ash	6F	40	60	-
	70% Fly ash	7F	30	70	-

*: 그림 또는 본문내 표기

수화열 측정용 분말과 SEM, XRD 및 강도시험용 시험체 제작에 필요한 결합재는 소정의 치환율로 결합재 종류에 따라 각각의 원재료들이 충분히 혼합되도록 V-믹서로 30분 강제 혼합하였고, 모든 시멘트 페이스트 배합과 모르타르 배합에는 결합재 치환율 변수 외 다른 요인을 배제시키기 위해 ISO 표준사와 증류수를 사용하였다. 강도 시험용 모르타르 배합은 KS L ISO 679「시멘트의 강도 시험 방법」에 따라 결합재:표준사:배합수=1:3:0.5로 시험체(40×40×160mm)를 제작하여 항온항습 챔버에서 24시간 양생 및 탈형 후, 즉시 수중 양생하였고, SEM 및 XRD용 시멘트 페이스트 배합은 결합재:배합수=1:0.5로 시험체(10×10×10mm)를 제작하여 항온항습실(온도 20±1℃, 습도 50±2%)에서 양생하였으며 각 재령시 에탄올 진공포화로 수화 정지시켜 시험하였다. 실험에 사용되는 OPC, P, 3F 및 5S 등의 배합전 X-Ray diffraction analysis method 분석결과를 그림 3-2-1-68에 대표적으로 나타내었다. 배합전후의 결합재 분말로 XRD 분석법을 실시하여, 회절도형의 피크상태로부터 결정발달의 정도를 알 수 있고 공통적으로 Calcium magnesium aluminum oxide

silicate 과 Calcium silicate가 주결정상으로 분석되었으며, 플라이애쉬 30% 치환한 결합재에서는 Quartz [SiO2], 고로슬래그 50% 치환한 결합재에서는 Brownmillerite 등의 성분이 주결정상으로 분석되었다.

배합 후의 각각의 결합재 시험편에서는 결정성이 좋은 Ca(OH)2은 27°의 첨점에서 나타나는 피크와 28°에서 나타나는 C3S 수화물의 상대적인 세기를 비교함과 동시에 에트링가이트의 피크 검출로 수화반응 변화를 직접적으로 추정할 수 있다.(Pelletier 2010)

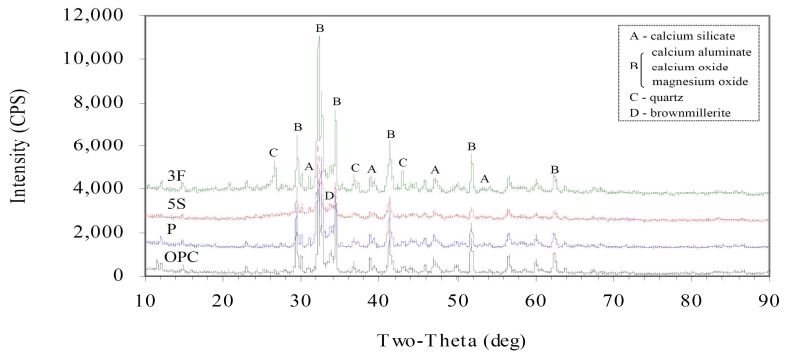


그림 3-2-1-68. 배합별 결합재 X-Ray 회절분석 결과

매스 콘크리트에 적용을 위한 벨라이트계 저열 포틀랜드시멘트에 고로슬래그와 플라이애쉬를 2 및 3성분계로 혼입한 결합재의 누적 72시간 및 28일 수화열 결과를 표 3-2-1-15와 초기 72시간 시간당 수화열 그래프를 그림 3-2-1-69에 나타내었다. 누적 수화열 그래프에 나타난 결과와 같이 모든 시멘트 페이스트 결합재에서 초기 24시간내 두 번의 단위 시간당 수화열 증진 피크가 크게 발생 하였으며, 발생 시간 또한 모든 배합에서 동시간에 측정되었다. 초기 피크는 1시간내, 두 번째 피크는 11~16시간시 발생되었고, 초기 두 번의 피크외에는 28일 수화열 측정 종료시까지 발생하지 않았다.

표는 수화열 시험결과로 벨라이트계 저열 포틀랜드시멘트(P)의 경우 28일 누적 수화열은 68.4cal/g, 플라이애쉬 치환한 2성분계 1F, 3F 및 5F의 28일 누적 수화열을 측정한 결과는 각각 66.5cal/g, 48.7cal/g 및 27.9cal/g로 벨라이트계 저열 포틀랜드시멘트와 고로슬래그 치환한 결합재 대비하여 플라이애쉬 함유량이 증가함에 따

라 높은 수화열 저감 효과를 보여주었다.

고로슬래그 치환한 2성분계 결합재인 3S, 5S 및 7S의 경우 미소수화열 측정결과 고로슬래그 치환율이 증가할수록 수화열이 감소하였다. 28일 누적수화열 결과는 각각 78.4cal/g, 70.6cal/g, 62.4cal/g로 벨라이트 저열 포틀랜드시멘트 대비 50% 치환율 경우까지 고로슬래그가 장기에 걸쳐 수화반응이 지속된 것을 알 수 있으며, 7S는 수화시 알칼리성분 감소로 인한 수화발현 감소로 보인다. 이와 같이, 고로슬래그 치환율이 증가함에 따라 수화열 감소 효과도 더 커지게 되지만 높은 치환율 대비 수화열 감소폭이 낮음을 알 수 있다.

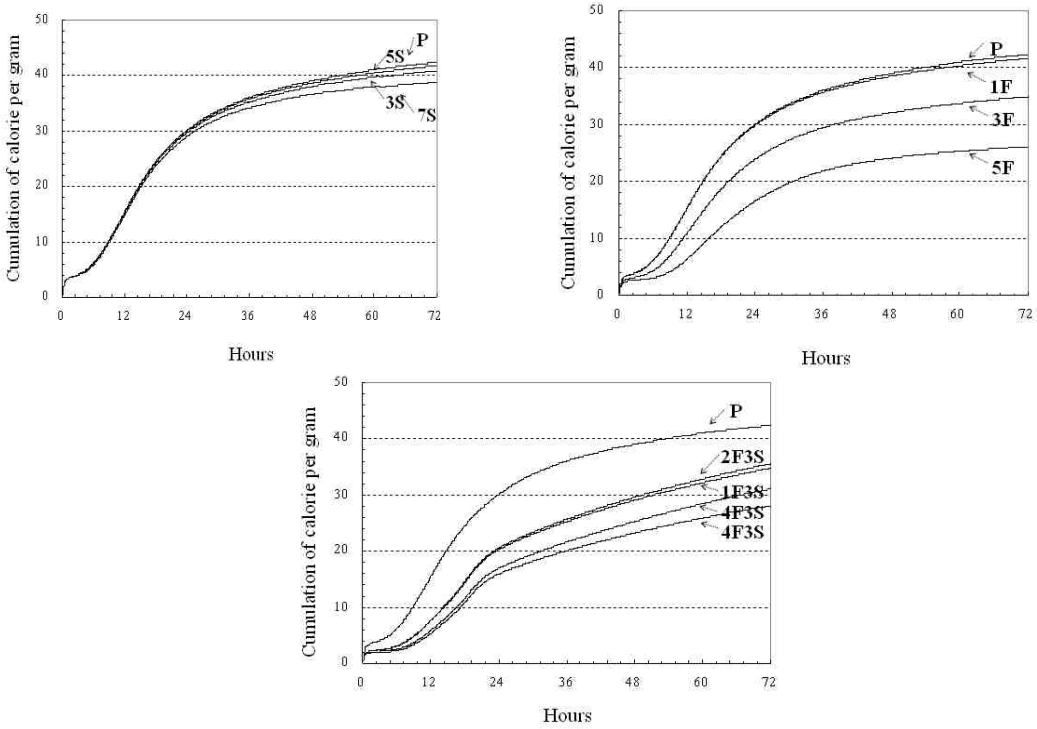


그림 3-2-1-69. 배합별 결합재 초기 미소수화열 측정결과 (cal/g/hr)

표 3-2-1-15. 배합별 결합재 미소수화결 측정결과

Mix Design		미소수화열	
		72hours, cal/g	28days, cal/g
Belite cement (Plain)		42.343	68.4
Ternary	10% Fly ash+30% Slag	34.062	65.8
	20% Fly ash+30% Slag	34.874	57.3
	30% Fly ash+30% Slag	30.402	44.8
	40% Fly ash+30% Slag	27.357	34.3
Binary	30% Slag	40.857	78.4
	50% Slag	41.739	70.6
	70% Slag	38.772	62.4
	10% Fly ash	41.666	66.5
	30% Fly ash	35.165	48.7
	50% Fly ash	26.227	27.9

플라이애쉬와 고로슬래그를 일부 치환한 3성분계 결합재인 1F3S, 2F3S, 3F3S 및 4F3S의 재령 28일 누적 수화열은 65.8cal/g, 57.3cal/g, 44.8cal/g, 34.3cal/g으로 모든 배합에서 벨라이트계 저열 포틀랜드시멘트의 누적 발열량(68.4cal/g) 보다 낮은 값을 보여주었으며, 특히 4F3S 결합재는 34.3cal/g으로 Plain 대비 약 50%의 저열 효과를 보여주었다.

표 3-2-1-14의 결합재 종류별 모르타르 시험체를 제작하여 1, 3, 7, 28 및 91일 재령별 강도시험 결과를 그림 3-2-1-70에 나타내었다. 벨라이트계 저열 포틀랜드시멘트(P)의 경우 재령 28일 압축강도는 41.97MPa이며, 플라이애쉬를 치환한 1F, 3F 및 5F의 재령 28일 압축강도는 33.25MPa, 20.03MPa 및 11.25MPa로 치환율 증가에 따른 큰 강도 감소를 보여주었으며, 50% 이상 치환한 경우 Plain 대비 73% 이상 압축강도가 크게 감소되었고 91일 장기 재령에서도 Plain배합의 7일 강도에도 미치지 못함을 확인하였다. 고로슬래그를 치환한 3S, 5S 및 7S의 압축강도는 48.53MPa, 44.35MPa, 37.55MPa로 3S의 경우 Plain 대비 15% 이상 높은 압축강도 결과와 실시한 모든 배합 중에서 초기 강도 발현대비 91일 장기 재령에서도 65.17MPa로 높은 압축 강도값을 나타남에 따라 3성분계 모르타르의 배합의 경우

30% 고로슬래그 치환율을 기준으로 하여 10~40% 4단계의 플라이애쉬 치환율을 변수로 배합하였다.

3성분계 결합재 배합인 1F3S, 2F3S, 3F3S 및 4F3S의 재령 28일시 압축강도 결과는 41.63MPa, 45.98MPa, 40.17MPa, 24.12MPa을 보여주어 4F3S를 제외한 모든 배합에서 40MPa 이상의 높은 강도 발현 효과를 보였으며, 또한 4F3S의 경우 24MPa 이상의 강도로 벨라이트계 저열 포틀랜드시멘트 중량 대비 치환율 70%를 기준으로 압축강도 결과는 7S>4F3S>7F의 결과를 보여줌을 알 수 있다.

벨라이트계 저열 포틀랜드시멘트, 고로슬래그와 플라이애쉬를 각각 혼합한 2성분계 결합재별 시멘트 페이스트내의 결정상태 및 미세 조직구조를 촬영한 SEM Image (Scanning Electron Microscope Analysis) 결과이다(표 3-2-1-16). 초기 수화생성물인 침상형태의 에트링가이트(E) 부터 경화된 시멘트 페이스트 내부의 수화생성물 즉 Ca(OH)2과 반응하여 C-S-H 등이 결정이 재령이 경과됨에 따라 치밀한 미세 결정 조직을 형성하였다. SEM 촬영 결과에서 C-S-H는 플라이애시 치환 결합재 대비 벨라이트계 저열 포틀랜드시멘트와 고로슬래그 치환 결합재가 다량 생성되었으며, 28일 재령의 3F 시험체에서 다량의 에트링가이트가 나타남을 알 수 있다. 재령일 증가에 따른 수화반응이 일어남에 따라 조직사이의 공극이 서로 연결되고 점차 구 형태로 경화 되는 조직 변화에 의해 시멘트 페이스트 매트릭스내부 공극이 결집되어 재령 경과에 따라 강도가 증가되는 것을 알 수 있다.

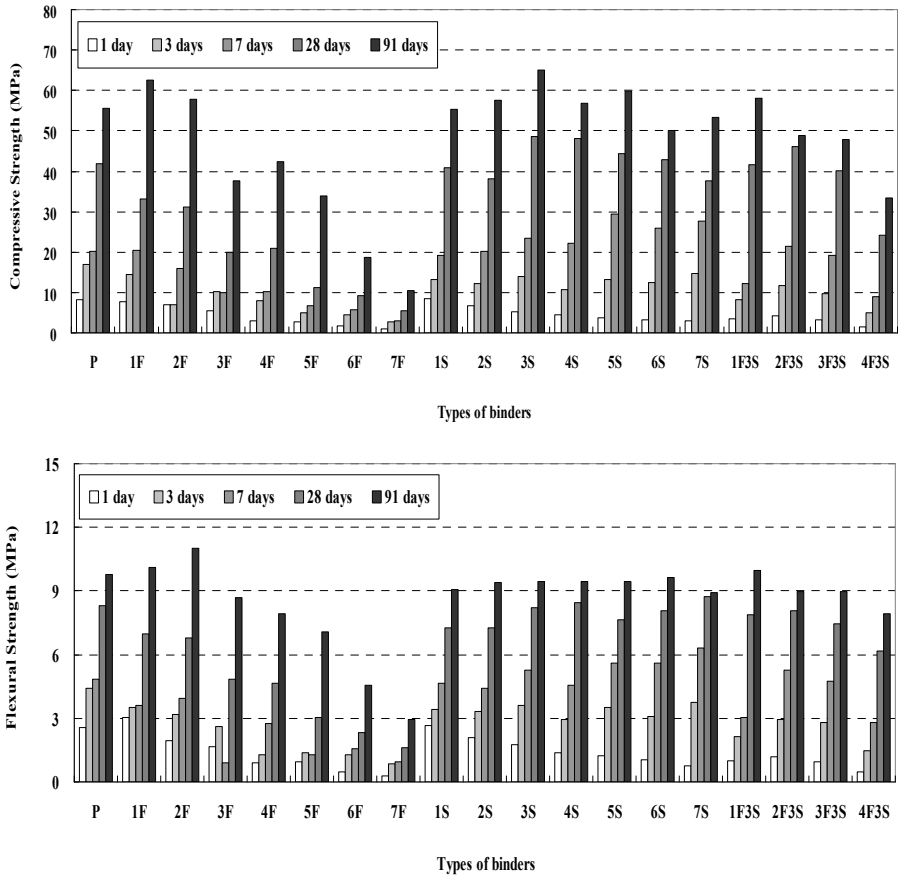
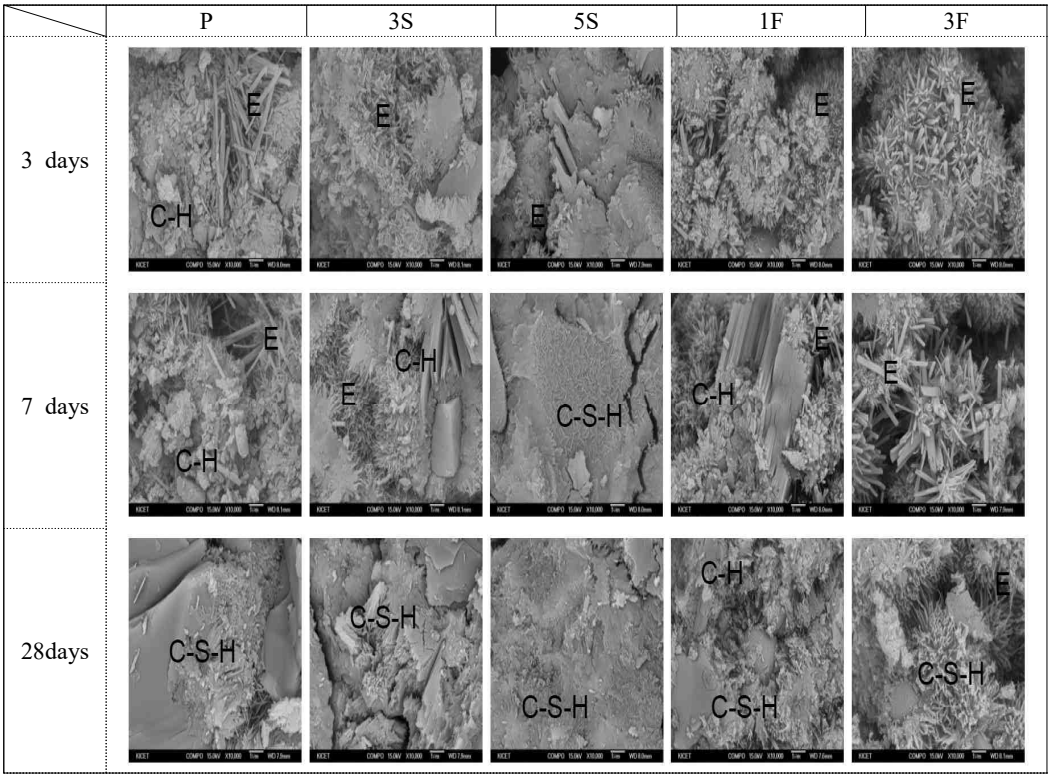


그림 3-2-1-70. 배합별 재령에 따른 압축강도 및 휨강도 측정 결과

표 3-2-1-16. 배합별 재령 3, 7 및 28 일에 있어서의 SEM 촬영 이미지



본 연구에서는 현재 상용화되고 있는 벨라이트계 저열 포틀랜드시멘트의 경우 재령 28일 누적 수화열이 68.4cal/g 대비 수화열이 낮으면서 압축강도를 발현 할 수 있는 2성분계 및 3성분계 저발열 시멘트 결합재를 사용한 실험 결과를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 플라이애쉬가 치환된 2성분계 결합재의 28일 누적 수화열은 P>1F>3F>5F의 순으로 낮게 나왔으며, 플라이애쉬 함유량의 증가함에 따른 높은 수화열 저감 효과를 보여주는 대신 28일 모르타르 압축강도에서 플라이 애쉬가 50% 이상 치환한 경우 20MPa 이하의 낮은 강도 값을 나타내었다.

2) 고로슬래그가 치환된 2성분계 결합재의 28일 누적 수화열은 3S> 5S> P> 7S의 순으로 낮게 나왔으며 고로슬래그 치환율이 증가함에 따라 수화열 감소 효과는 높은 치환율 대비 낮은 수화열 감소폭으로 저열 효과는 낮지만, 3S, 5S는 28일 모르

타르 압축강도가 44MPa 이상의 높은 강도 발현 효과를 나타내었다.

3) 플라이애쉬와 고로슬래그가 치환된 3성분계 결합재의 28일 누적 수화열의 경우 P>1F3S>2F3S>3F3S>4F3S의 순으로 낮은 수화열 결과를 보여주었다. 특히 4F3S는 미소수화열 35cal/g 이하로 Plain 대비 50%의 저열 효과를 보여주고, 28일 모르타르 압축강도의 경우에는 1F3S, 2F3S 및 3F3S가 40MPa 이상의 높은 강도 발현 효과와 4F3S는 24MPa의 강도를 보여줌으로써 매스 콘크리트 공사시 3성분계 결합재를 활용하여 수화열에 의한 온도 상승폭을 감소시켜 전체 콘크리트의 품질, 내구성, 수밀성 및 강도 등을 저하시키는 균열을 제어하는데 효과적이라고 판단되어 4F3S 배합을 최종적인 초저발열 결합재 배합으로 선정하였다.

② 연구수행 결과(성과)

- 특허출원 (10-2010-0021920, 초저발열 시멘트 조성물)
- 학술활동 (한국콘크리트학회 논문집 Vo. 23, No. 2, pp. 145-150, 벨라이트계 혼합 결합재의 수화열 특성에 관한 연구)

(2) 초저발열 콘크리트 개발

(가) 초저발열 콘크리트의 목표성능 설정

① 목표성능 : 단열온도상승치 (20MPa-15℃이하)

㉮ 초저발열 콘크리트의 경우 강도대별로 목표 단열온도상승치 최대값을 설정하였음.

(나) 초저발열 콘크리트 배합설계

① 연구수행 내용

개발된 초저발열 결합재를 사용하여 20MPa과 30MPa 강도대별로 설정된 단열온도상승치를 만족하는 콘크리트 배합을 Trial-error 방식을 도입하여 최종적으로 표 3-2-1-17에 나타낸 바와 같이 도출하였다. 배합에 사용된 굵은골재 최대치수는 25mm 이며, 목표슬럼프는 15cm, 공기량은 4.5%를 기준으로 하였다.

표 3-2-1-17. 초저발열 콘크리트 배합표

배합 강도 (MPa)	No. 배합	단위중량 (kg/m^3)							28일 강도 (MPa)	ΔT
		배합수	초저발열 결합재	고로 슬래그	플라이 애시	잔골재	굵은 골재	공기량 (%)		
20MPa	KCL-1.1	135	177	60	85	898	947	4.5	20	15
30MPa	KCL-2.1	150	400	-	-	706	848	4.5	31	39
	KCL-2.2	130	307	-	-	822	1059	4.5	28	27
	KCL-2.3	175	417	-	-	722	930	4.5	36	36

한국건설생활환경시험연구원에서 보유한 콘크리트 단열온도 시험 장치(50L)와 측정된 단열온도에 대한 시험결과를 그림 3-2-1-71 및 그림 3-2-1-72에 나타내었다.

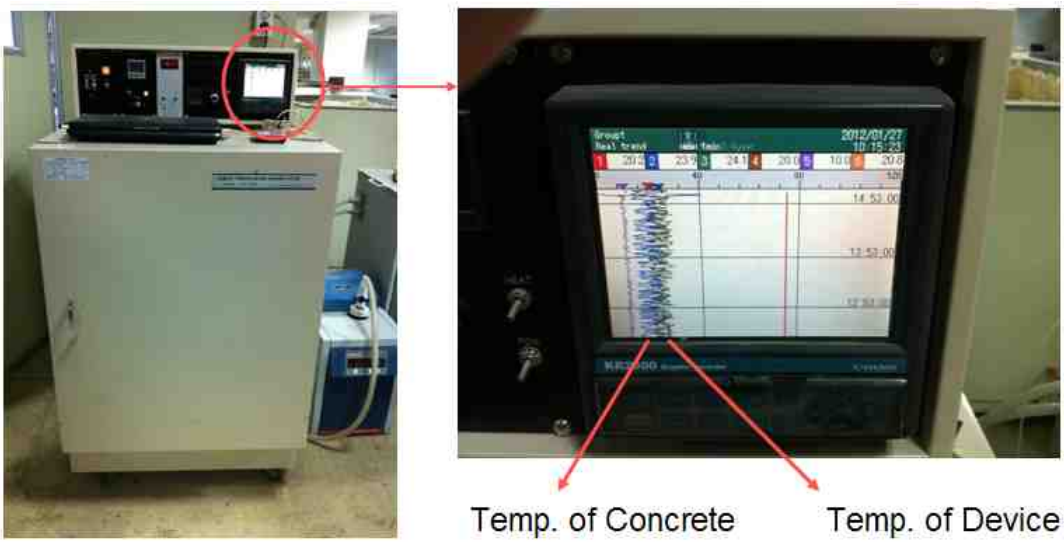


그림 3-2-1-71. 콘크리트 단열온도 시험 장치

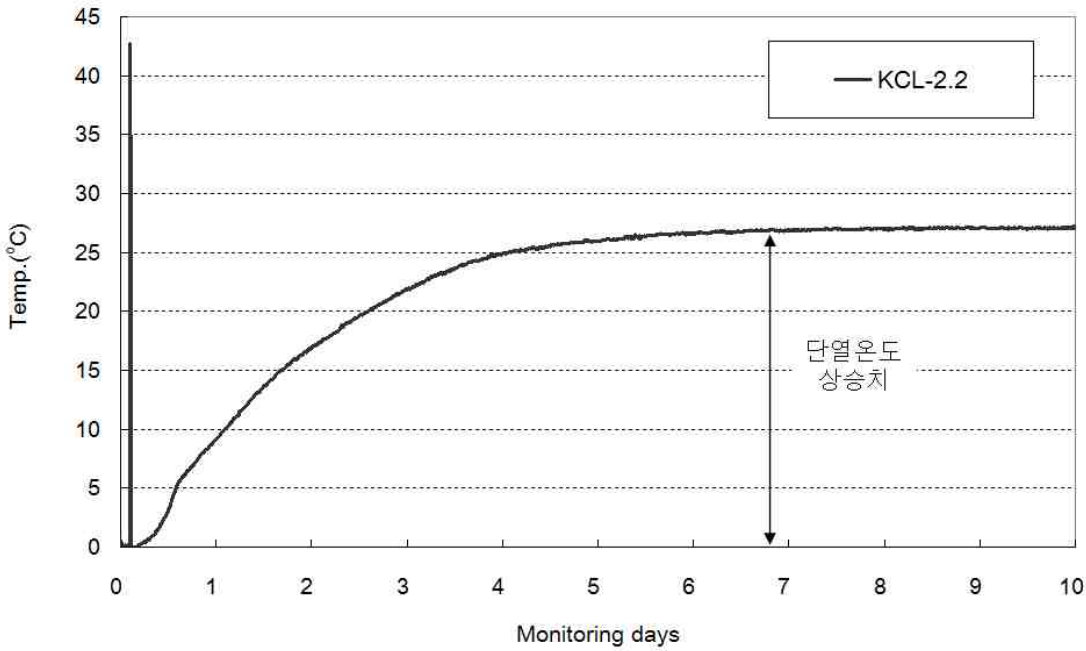


그림 3-2-1-72. 콘크리트 단열온도 시험 결과

또한 개발된 매스콘크리트 Mock-up 구조물 타설시 필요한 현장 배합을 적용하기 위한 매스콘크리트 구조물 기초 매트 10×20×0.6m 크기로 한국건설생활환경시험연구원 옥외폭로시험장에 그림 3-2-1-73과 같이 타설하였다.



그림 3-2-1-73. 초장대교량 사업단 Mock-up Test 현장적용

설치된 기초 매트와 상부에 설치될 Mock-up 구조물을 구속시키고 내외부 온도

및 온도 응력 등에 대한 계측 모니터링 및 외기 온도를 고려하여 충분한 양생 기간을 두고 있으며, 상부에 설치될 4×4×4m 크기의 Mock-up 구조물에 대한 현장 배합을 고려하여 표 3-2-1-18과 같이 상용화되어 있는 저열시멘트, 고로슬래그 미분말, 플라이애시 등을 초저발열 결합재로 적용한 배합을 도출하였다.

표 3-2-1-18. Mock-up 타설용 초저발열 콘크리트 배합표

No. 배합	단위중량 (kg/m^3)							7일 강도 (MPa)	ΔT
	배합수	저열 시멘트	고로 슬래그	플라이 애시	잔골재	굵은 골재	공기량 (%)		
KCL-4.1	164	100	176	155	765	892	4.5	4.3	13.7
KCL-4.2	170	165.6	82	160	776	920	4.5	16.5	28.4
KCL-4.3	170	197.1	97	190	710	916	4.5	17.9	34.5
KCL-4.4	160	145.4	80	180	773	950	4.5	14.9	29.5
KCL-4.5	160	160.0	80	160	776	953	4.5	14.8	27.8
KCL-4.6	160	143.0 (1종시멘트)	80	180	773	950	4.5	17.9	32.0

KCL-4.1~KCL-4.6에 대한 단열온도 시험 모니터링 결과는 그림 3-2-1-74와 같이 도시화하였다. 결합재의 종류 및 배합량에 따라 단열온도 차이를 보여주며, 특히 저열(4종) 및 1종 시멘트 배합량에 따른 단열온도가 상승됨을 보여준다.

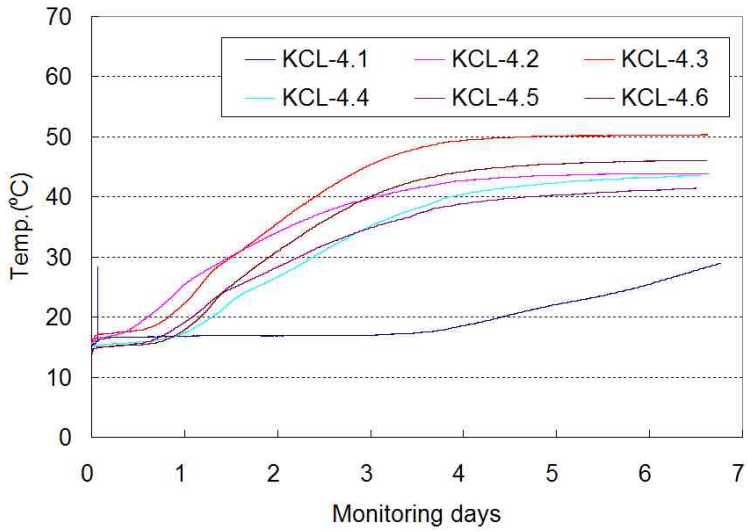


그림 3-2-1-74. 콘크리트 단열온도 측정 결과

② 연구수행 결과(성과)

- 초저발열 콘크리트 배합설계

- 학술활동 (한국건설순환자원학회 2011년 가을학술발표회, 매스콘크리트용 초저발열 콘크리트 단열온도상승거동 시험평가)

(3) 수화열로 인한 온도균열 저항성 정량평가 시스템 구축

(가) 시험장치 및 평가기법

① 시험장치

콘크리트의 부피변화에 따른 균열저항성 및 안정성을 시험적으로 평가하기 위한 방식으로 국내에서는 KS F 2595 및 ASTM C 1581 과 같은 콘크리트의 수축으로 인한 균열저항성 평가기법이 있다. 이렇듯 현존하는 시험평가 기법은 콘크리트의 수축과 관련된 평가에 한정되어져 있고, 외적인 구속도에 대한 정량적인 접근이 이루어지고 있지 않아 균열가능성에 대한 정량적인 평가가 제대로 이루어지고 있지 않다. 이에 본 연구에서는 다음과 같이 ASTM C 1581의 시험기법을 확장하여 개선한 Dual-Ring 시험기법을 고안하였으며, 기본적인 개요도 및 시험장치는 그림 3-2-1-75 및 3-2-1-76에 나타나 있다.

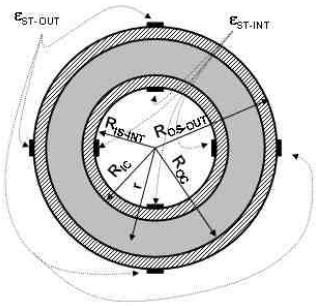


그림 3-2-1-75. Dual Ring 시스템 개요도



그림 3-2-1-76.. Dual Ring 시스템 실제 이미지

위에서 보인 바와 같이 콘크리트 내측 및 외측에 Steel ring 이 존재하여 콘크리트의 수축 및 팽창시 구속력을 부여하게 된다. 이때 발생된 내부응력은 Steel ring 에 부착한 Strain gauge가 측정, 발생된 응력치를 계산하는데 사용할 수 있도록 하

였다. 즉, 이와 같은 시스템적 접근으로 콘크리트의 부피변화 및 구속에 따른 균열 가능성을 소규모의 실험실 수준에서 정량적으로 평가할 수 있는 시스템을 구축하였다.

위에서 보인 바와 같이 콘크리트의 부피 변화시 Steel ring에 의한 외적구속에 따른 응력발생은 기하학적 조건, 즉 콘크리트의 두께 및 steel ring의 두께 등과 관련이 있다. 이와 같은 기하학적 조건에 따른 내적, 외적 구속도는 식 (3-2-1-11)에 의해서 각각 구할 수 있다. (Moon 2006, Moon and Weiss 2006, Radlinska 2006)

$$\psi = 100\% - 100\% \frac{E_C^{'}}{E_{ST}} \frac{1}{\left(\frac{E_C^{'}}{E_{ST}}\right) - \frac{1-\left(\frac{R_{IS}^2}{R_{IC}^e}\right)\left[\left(1+\nu_C\right)\left(\frac{R_{OC}^2}{R_{IC}^2}\right)+\left(1-\nu_C\right)\right]}{1-\left(\frac{R_{OC}^2}{R_{IC}^2}\right)\left[\left(1+\nu_S\right)\left(\frac{R_{IS}^2}{R_{IC}^2}\right)+\left(1-\nu_S\right)\right]}} \qquad (3\text{-}2\text{-}1\text{-}11)$$

한편, 콘크리트의 부피변화로 인한 응력 발생치는 식 (3-2-1-12)에 의해 구하여 질 수 있다.

$$\sigma_\theta(r) = p_{INT}\left[\frac{R_{IC}^2 R_{OC}^2}{\left(R_{OC}^2 - R_{IC}^2\right)}\frac{1}{r^2} + \frac{R_{IC}^2}{\left(R_{OC}^2 - R_{IC}^2\right)}\right] - p_{OUT}\left[\frac{R_{IC}^2 R_{OC}^2}{\left(R_{OC}^2 - R_{IC}^2\right)}\frac{1}{r^2} + \frac{R_{OC}^2}{\left(R_{OC}^2 - R_{IC}^2\right)}\right] \qquad (3\text{-}2\text{-}1\text{-}12)$$

여기서, $$p_{INT} = -\varepsilon_{ST-INT} \cdot E_{ST-INT}\left[\frac{R_{IC}^2 - R_{IS-INT}^2}{R_{IC}^2}\right]$$

$$p_{OUT} = \varepsilon_{ST-OUT} \cdot E_{ST-OUT}\left[\frac{R_{OS-OUT}^2 - R_{OC}^2}{R_{OC}^2}\right]$$

즉, 식 (3-2-1-11)에 의거하여 원하는 구속조건을 부여함과 함께, 식 (3-2-1-12)에 의하여 해당 구속도 하에서 콘크리트의 부피변화에 따른 발생응력을 정량적으로 평가할 수 있는 시험평가 기법임을 알 수 있다.

(나) 시험평가 예시 (시험수행 결과)

① 시험수행 예시 및 결과

표 3-2-1-19에 제시된 매스콘크리트용 초저발열 콘크리트에 대하여 온도균열저항성능을 Dual ring 시스템으로 평가하였다.

표 3-2-1-19. 초저발열 콘크리트 배합표

배합강도 (MPa)	단위중량 (kg/m^3)						
	배합수	초저발열 결합재	고로슬래그	플라이애시	잔골재	굵은골재	SP-PC계
30MPa	137	283	30	28	833	991	3.4

한편, 분석평가에 적용된 Dual ring 시스템은 콘크리트 초기재령에서 외부구속 60%, 내부구속 75% 조건을 구현해주는 사이즈를 식 (3-2-1-11)로부터 선정하였다. (RIS-INT=140mm, RIC=152.5mm, ROC=228.5mm, ROS-OUT=238.5mm)

또한, 매스콘크리트의 단열온도상승조건을 Dual ring 시스템에 구현하기 위하여 상기의 콘크리트에 대한 사전평가로 재령 3일, 7일 28일 인장강도 및 단열온도상승시험을 수행하여 시간에 따른 온도변화 곡선을 구하였으며, 동일한 환경조건을 구현해줄 수 있는 정밀챔버 환경 하에서 그림 3-2-1-77과 같이 Dual ring 시험을 수행하였다. 이러한 조건은 콘크리트의 온도상승으로 인한 팽창조건이기 때문에 Dual ring 중 외측 Ring의 변형률을 측정한 결과를 그림 3-2-1-78과 같이 구하여 식 (3-2-1-12)으로부터 발생된 응력값을 구하였다.

적용된 콘크리트의 재령 3일 및 재령 7일에서의 인장강도는 각각 0.78 및 1.09 MPa 이었으며, 구속도 60%에 있어서의 재령 3일 및 재령 7일에서의 발생인장응력은 각각 0.43 및 0.70 MPa 이었다. 이에 의거하여 인장강도와 온도인장응력의 비인 균열지수를 계산한 결과 재령 3일 및 7일에서 각각 1.81 및 1.56을 구할 수 있었다.



그림 3-2-1-77. Dual ring 시험수행 전경

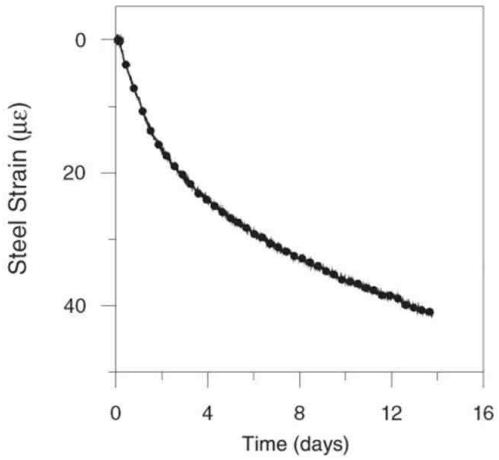


그림 3-2-1-78. 외측 Ring 측정 변형률 그래프

마찬가지 방식으로 배합강도가 30MPa인 OPC 1종 시멘트만을 사용한 콘크리트의 경우, 동일시험을 수행한 결과, 재령 3일 및 재령 7일에서의 균열지수가 각각 1.20 및 1.16을 나타내었다. 이는 그림 3-2-1-79의 균열지수에 따른 균열가능성을 평가할 때, 50% 이상의 균열발생률 저감이 이루어짐을 확인할 수 있다. 즉, 본 연구에서 개발된 초저발열 콘크리트 배합을 적용함으로써 수화열로 인한 온도균열 발생가능성을 크게 감소시킬 수 있으리라 판단된다.

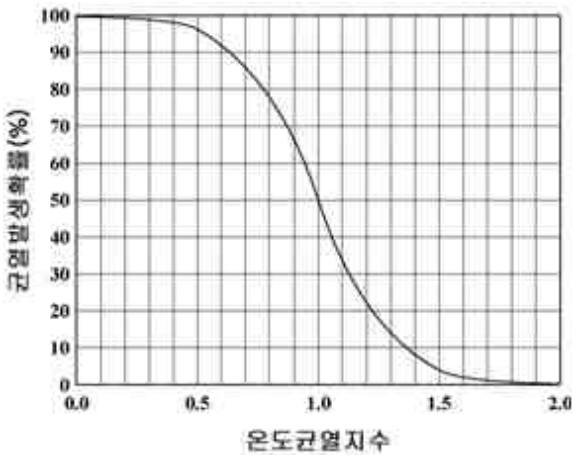


그림 3-2-1-79. 균열발생확률 vs. 온도균열지수

(다) 온도균열 저항성 정량평가 시스템 구축

① 온도균열 정량평가 시스템

그림 3-2-1-80는 상기에서 밝힌 Dual ring을 사용하여 구속된 조건하에서 수화열로 인한 온도규열 발생 저항성을 정량평가하기 위한 통합적인 시스템의 구성도를 보여주고 있다.

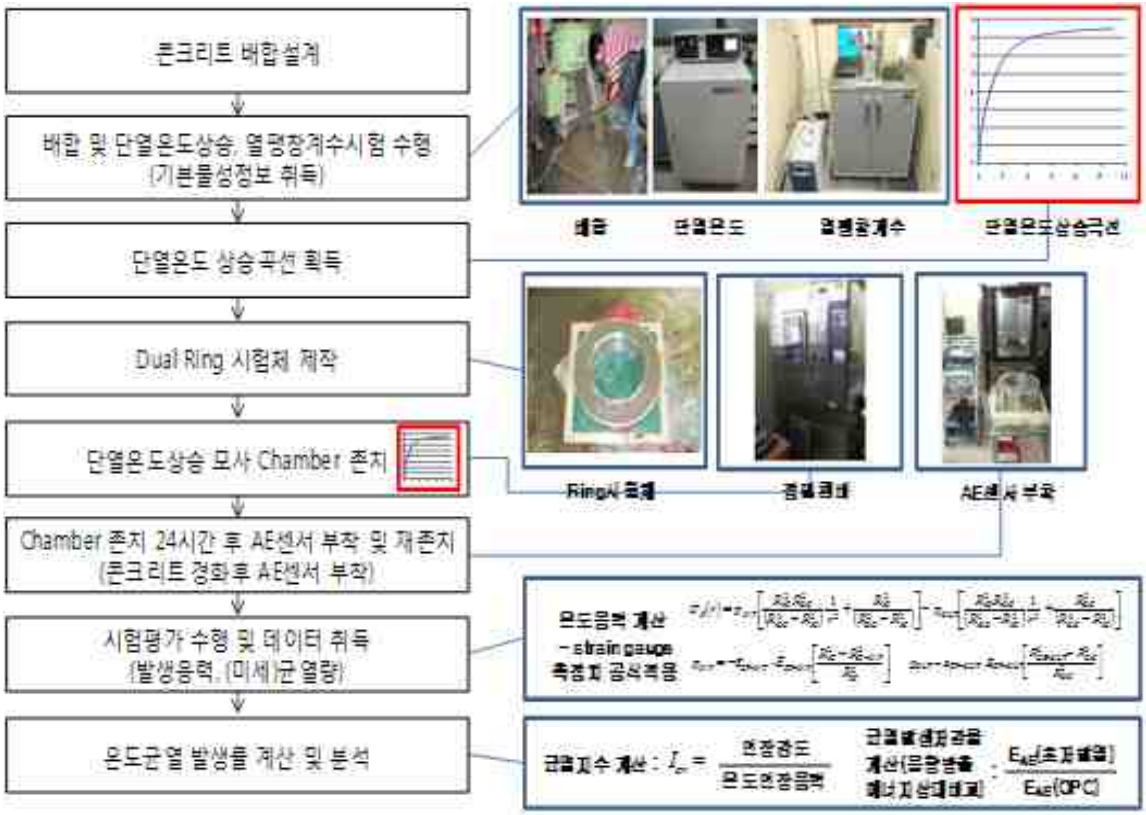


그림 3-2-1-80. 온도균열 발생률 정량평가 시스템 개요도

그림 3-2-1-65에서 보이는 바와 같이 본 정량평가 시스템은 실험실 수준에서 매스콘크리트의 수화열로 인한 온도균열저항성, 즉 균열지수를 정량적으로 평가할 수 있는 시스템으로서, 일반적으로 매스콘크리트의 시공시에 수행되어지고 있는 대형 Mock-up 시험이나, 컴퓨터 시뮬레이션 해석에 대응할 수 있는 시험평가 기법으로 활용되어질 수 있으리라 판단된다.

② 연구수행 결과(성과)

- 특허출원 1건 (10-2011-0124420, 정량적인 시험에 의한 매스 콘크리트의 온도균열저항성 측정방법 및 매스콘크리트의 온도균열저항성 측정 장치)

- 학술활동 1건 (한국건설순환자원학회 2011년 가을학술발표회, 콘크리트 부피변화에 따른 균열저항성 시험평가 기법 연구)

(4) 초저발열 콘크리트 개발 (단열온도 상승분 35℃ 이하 및 설계기준강도 35 MPa)

저발열 시멘트 조성물의 경우 재령 28일 누적수화열이 60cal/g 정도로 비교적 높은 수화열을 보이고 있어 매스 콘크리트 타설시 별도의 냉각 장치를 사용하는 경우가 대부분이다. 따라서 재령 28일 누적수화열이 35cal/g 보다 낮으면서 필요의 압축강도를 발현 할 수 있도록 초저발열 콘크리트용 결합재 개발을 하였다.

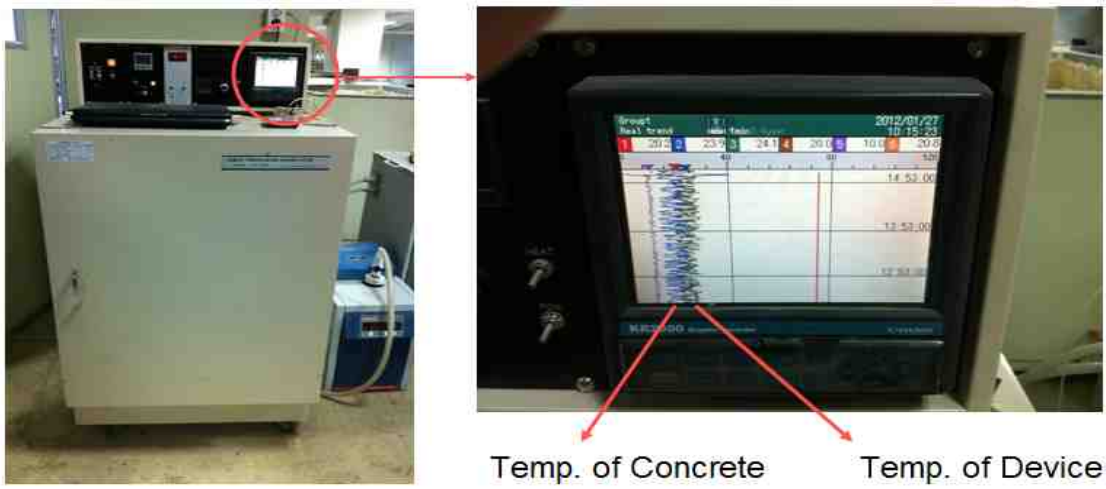


그림 3-2-1-81. 콘크리트 단열온도 시험 장치

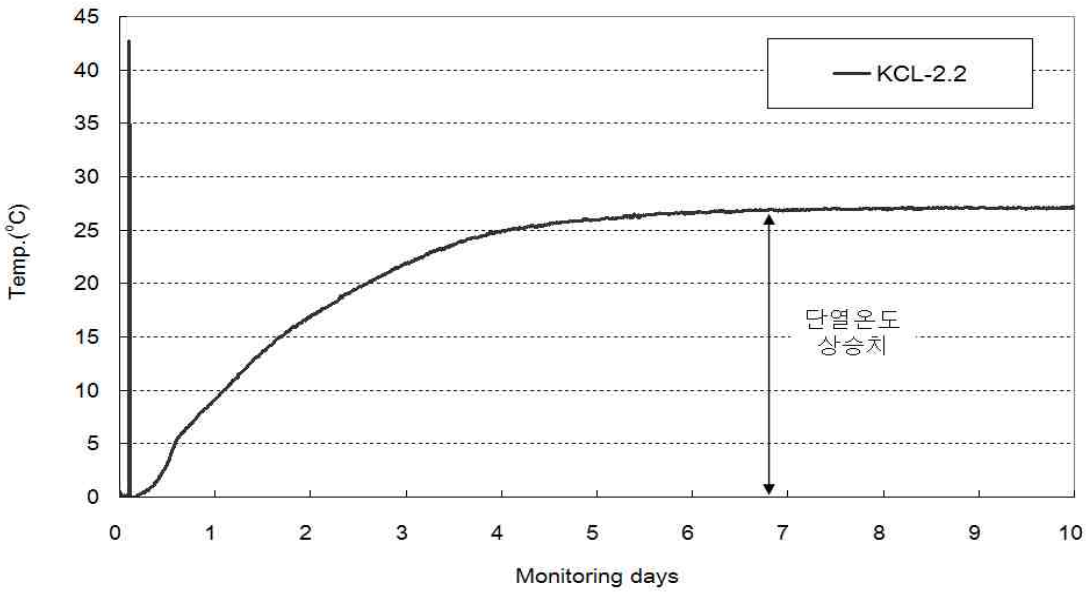


그림 3-2-1-82. 콘크리트 단열온도 시험 결과

(가) 초저발열 결합재의 구성재료 선정

저열포틀랜드 시멘트 : KS L 5201의 저열 포틀랜드 시멘트로서, 벨라이트(Bellite : $2CaO \cdot SiO_2$ / "C_2S"라고 약칭함)의 함량이, 상기 4종 포틀랜드 시멘트 100중량부에 대해 40중량부 이상으로 함유된 것으로 이루어지는 것이 바람직하다. 특히, 본 연구에서는 벨라이트 49중량부, 알라이트 28중량부, 알루미네이트 6 중량부, 페라이트 12 중량부 및 무기 황산염 5 중량부의 조성을 가진 재료를 사용하였다.

고로슬래그 미분말 : 분말도 4,000 ~ 4,300cm^2/g

플라이애시 : 분말도 3,000 ~ 4,500cm^2/g

표 3-2-1-20. 시멘트 조성물별 미소수화열

Compound	Hydration heat	
	Joule/g	Cal./g
C_3S	502	120
C_2S	260	62
C_3A	867	207
C_4AF	419	100

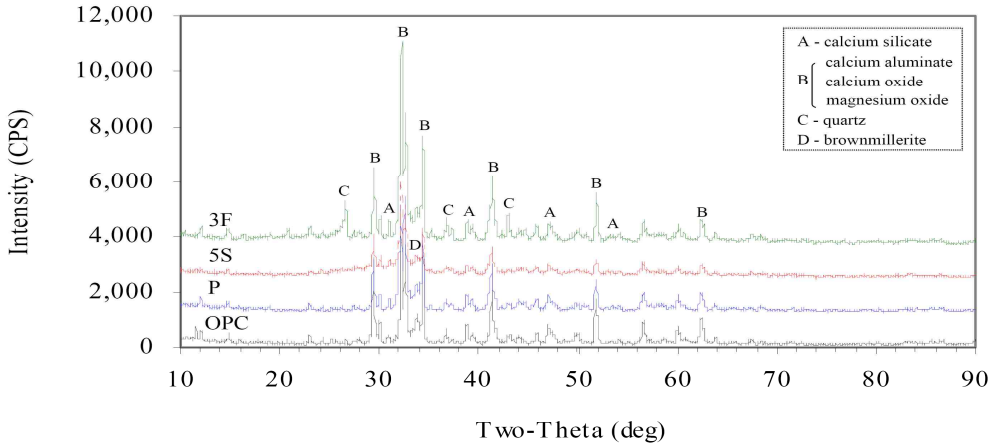


그림 3-2-1-83. 배합별 결합재 X-Ray 회절분석 결과

(나) 초저발열 결합재의 구성비 선정

초저발열 결합재의 미소수화열 35cal/g을 만족하면서 요구 압축강도 20~35MPa을 만족하는 구성비를 선정하기 위하여 각 재료의 구성비를 달리 하여 압축강도 및 미소수화열을 측정한 결과를 다음 표에 나타내었다. 이 때, 압축강도 시험은 KS L 5105(수경성 시멘트 모르타르의 압축강도 시험방법)에 따라 수행한 결과이며, 수화열의 측정은 KS L 5121(포틀랜드 시멘트의 수화열 시험방법)에 따라 수행하여 측정된 결과 값이다.

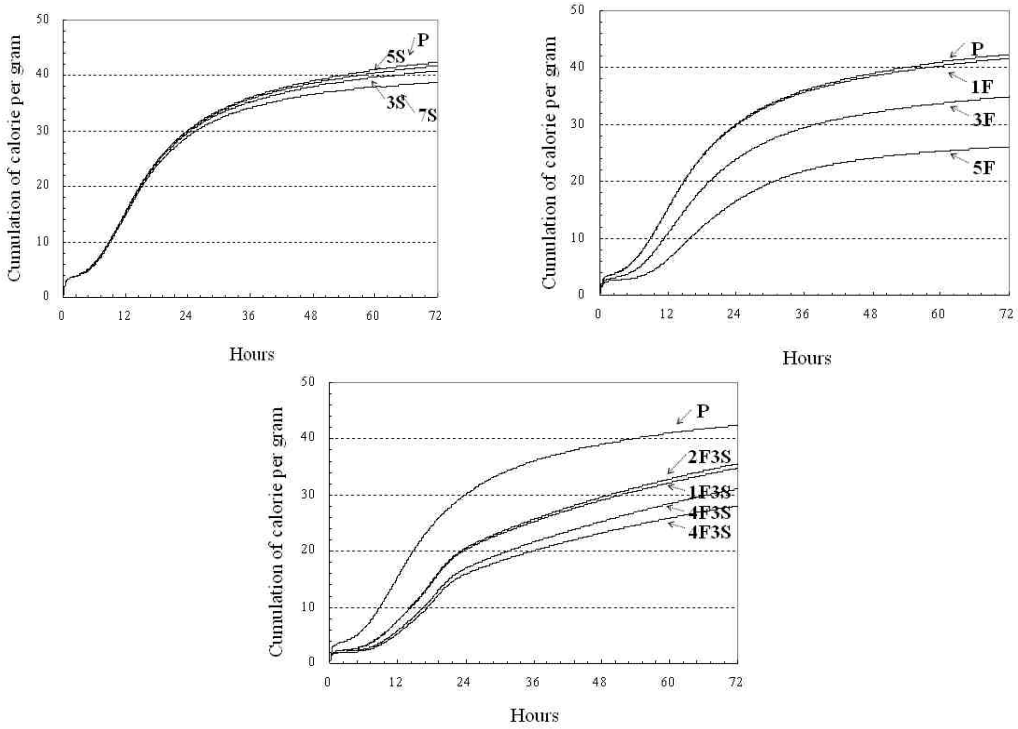


그림 3-2-1-84. 배합별 결합재 초기 미소수화열 측정결과 (cal/g/hr)

표 3-2-1-21. 구성비에 따른 압축강도 및 누적수화열 평가

구분	구성비 (%)			W/C	28일 압축강도 (MPa)	28일 누적수화열 (cal/g)
	저발열 시멘트	고로슬래그 미분말	플라이애시			
P1	100	-	-	0.5	41.97	68.4
T1	70	30	-	0.5	48.53	78.4
T2	50	50	-	0.5	44.35	70.6
T3	30	70	-	0.5	37.55	62.4
T4	90	-	10	0.5	33.25	66.5
T5	70	-	30	0.5	20.03	48.7
T6	50	-	50	0.5	11.25	27.9
P2	60	30	10	0.5	45.98	65.8
T7	50	30	20	0.5	41.63	57.3
T8	40	30	30	0.5	36.17	44.8
T9	30	30	40	0.5	24.12	34.3
T10	20	30	50	0.5	16.74	30.2

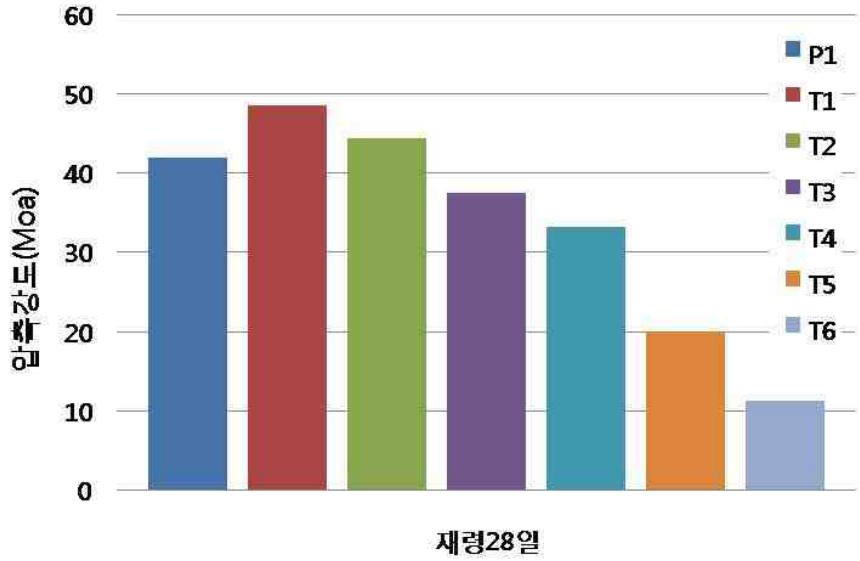


그림 3-2-1-85. 결합재 종류별 압축강도-1

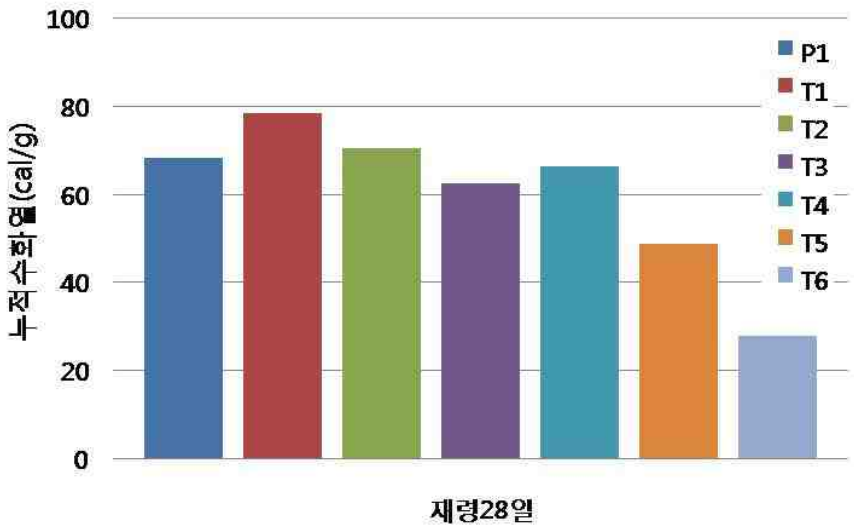


그림 3-2-1-86. 결합재 종류별 누적수화열-1

슬래그와 플라이애시 함유에 따른 예비적인 비교실험에 후속하여 3성분계 배합에 대한 비교시험을 수행한 결과는 그림과 같다.

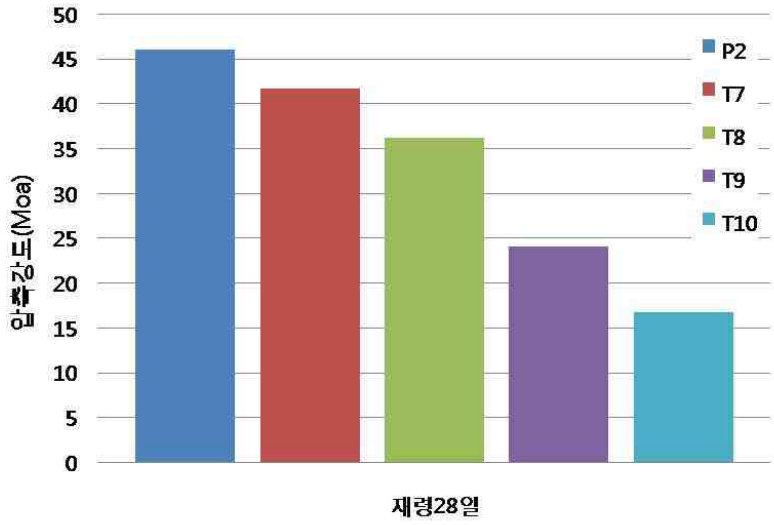


그림 3-2-1-87. 결합재 종류별 압축강도-2

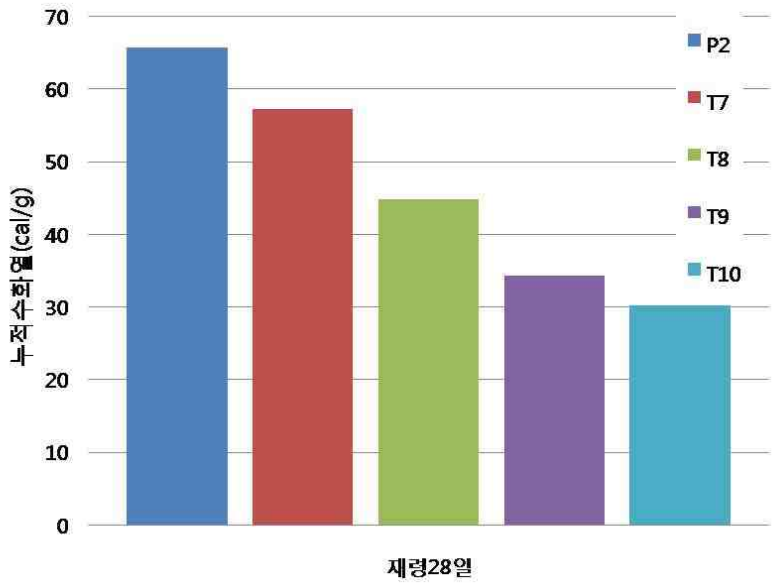


그림 3-2-1-88. 결합재 종류별 누적수화열-2

(5) Test-bed 관련 초저발열 결합재를 사용한 초저발열콘크리트의 품질

초저발열 콘크리트의 품질은 저열시멘트, 고로슬래그 미분말 및 플라이애시가 혼입된 3성분계 초저발열 결합재를 사용하기 때문에 각 재료의 품질 뿐 만 아니라, 초저발열

결합재 자체의 품질 또한 균일하도록 하여야 한다.

콘크리트의 단열온도 상승은 매스 콘크리트의 온도변화에 따른 균열 가능성을 평가하기 위한 기본적인 계수이며, 일반적으로 다음의 식으로 표현된다.

$$Q(t) = Q_{\infty}[1 - \exp^{-r(t-t_{0,Q})^{s}}]$$

즉, 매스 콘크리트에 적용되는 초저발열 콘크리트에 있어서 온도 및 온도응력을 해석하기 위해서는 최종단열온도상승량(Q_{∞})과 온도상승속도에 대한 계수(r)가 필요하다.

이러한 단열온도 상승은 필요에 따라 시험에 의하여 결정하는 것이 바람직하며, 다음은 본연구에서 개발한 초저발열 결합재를 사용한 초저발열 콘크리트의 실험결과로부터 구하여진 단열온도 상승곡선 공식이다. 여기서, 결합재는 3성분계의 특성을 가지며, 단열온도 상승량이 15℃인 콘크리트는 플라이애쉬 치환률이 40%, 고로슬래그 치환률이 43%인 경우이며, 단열온도 상승량이 35℃인 콘크리트는 플라이애쉬 치환률이 20%, 고로슬래그 치환률이 30%이다



그림 3-2-1-89. Dual ring 시험수행 전경

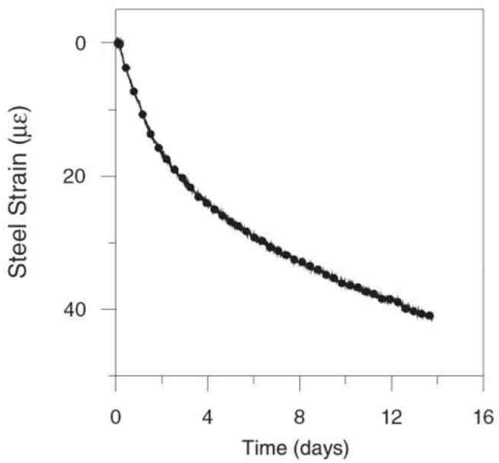


그림 3-2-1-90. 외측 Ring 측정 변형률 그래프

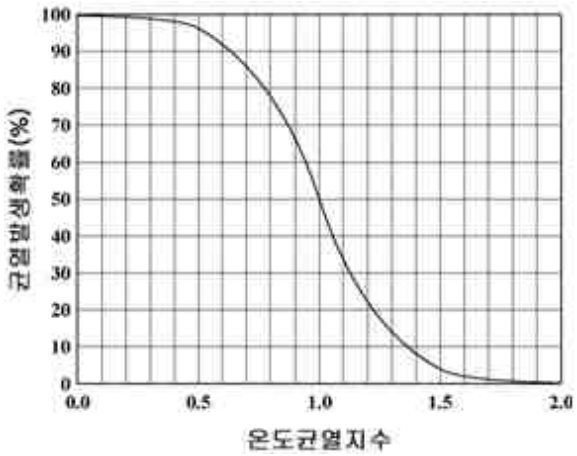


그림 3-2-1-91. 균열발생확률 vs. 온도균열지수

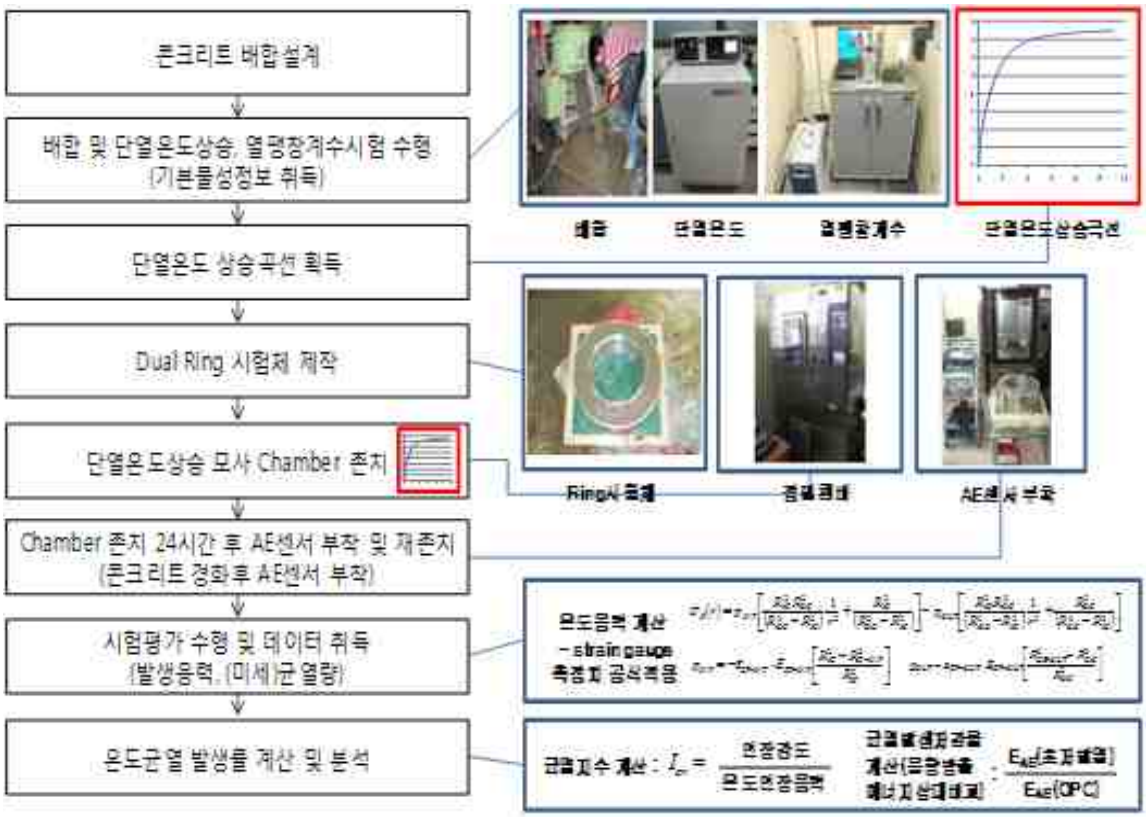


그림 3-2-1-92. 온도균열 발생률 정량평가 시스템 개요도

표 2-2-4 초저발열 콘크리트의 단열온도 상승량에 따른 단위재료량

단위재료량 (kg/m^3)				
단열온도 상승량	물	초저발열 결합재	잔골재	굵은골재
15 ℃	135	322	898	947
35 ℃	135	447	820	937

표 3-2-1-22. 초저발열 콘크리트의 단열온도 상승곡선 계수의 표준값

단열온도 상승량	근사식	계수 a 및 b	
15°	$Q_\infty = a + b \times T_a$	$a = 4.7 + 0.025\,W_c$	$b = 0.0646 - 0.00014 \times Wc$
	$r = a + b \times T_a$	$a = 0.72 + 0.005 \times Wc$	$b = -0.0023 + 0.000005 \times Wc$
	$s = a + b \times T_a$	$a = 0.22 + 0.0010 \times Wc$	$b = 0.0027 - 0.00002 \times Wc$
	$t_{0,Q} = a \times e^{(-b \times T_a)}$	$a = 1.18 - 0.00115 \times Wc$	$b = 0.0045 - 0.000004 \times Wc$
35°	$Q_\infty = a + b \times T_a$	$a = 12.2 + 0.05 \times Wc$	$b = 0.0746 - 0.00016 \times Wc$
	$r = a + b \times T_a$	$a = 0.41 + 0.0003 \times Wc$	$b = -0.0018 + 0.00004 \times Wc$
	$s = a + b \times T_a$	$a = 0.25 + 0.00104 \times Wc$	$b = 0.0029 - 0.00002 \times Wc$
	$t_{0,Q} = a \times e^{(-b \times T_a)}$	$a = 1.18 - 0.00115 \times Wc$	$b = 0.05 - 0.000003 \times Wc$

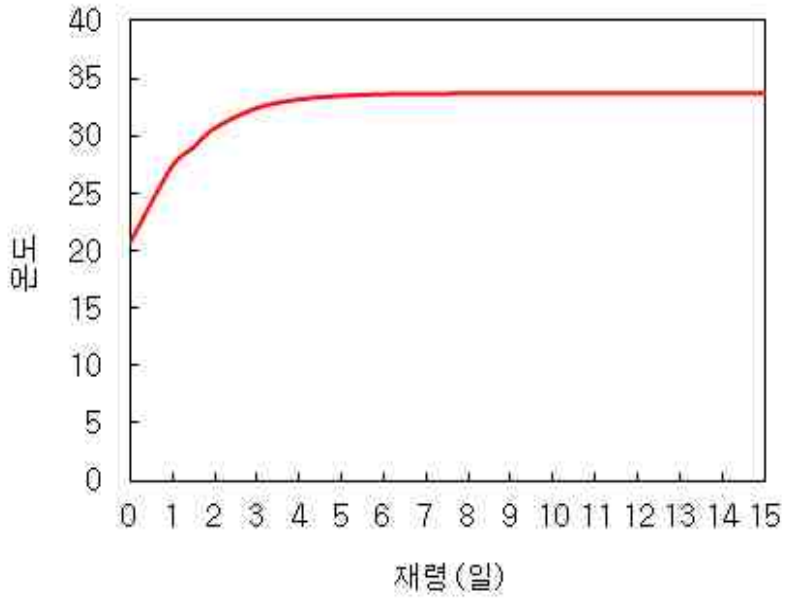


그림 3-2-1-93. 단열온도 상승량 = 15°일 때의 단열온도 상승곡선

(6) 학회에 제안한 온도균열 평가 방안

(가) 적용범위

이 지침은 실내시험에 의한 매스 콘크리트의 정량적인 온도균열 가능성 평가방법 및 매스 콘크리트의 온도균열 가능성 측정 시스템에 대하여 규정한다.용토록 한다.

(나) 인용규격

다음에 제시하는 규격은 이 규격에 인용됨으로써 이 규격의 규정 일부를 구성한다. 이러한 인용 규격은 그 최신판을 적용한다.

KS F 2405 콘크리트의 압축 강도 시험 방법

KS F 2423 콘크리트의 쪼갬 인장 강도 시험 방법

KS F 2438 콘크리트 원주 공시체의 정탄성 계수 및 포아송비 시험 방법

(다) 시험 기구 및 장비

- 본 시험에 사용되는 시험기구 및 장비는 콘크리트 시험체에 구속력을 부여하는 구속링, 구속력을 부여하는 장치에 부착된 변형률 측정센서, 데이터로거, 콘크리트 시험체, 구속링과 시험체를 거치하는 받침판 및 콘크리트 단열온도 상승 모사를 위한 환경챔버로 구성된다.

- 구속력을 부여하는 장치는 콘크리트 시험체 내측과 외측에 위치하는 링 형태의 금속체로서, 콘크리트 팽창시의 구속력 부여를 위한 외측링과 콘크리트 수축시의 구속력 부여를 위한 내측링으로 구성되며, 이러한 구속링은 콘크리트의 수화열로 인한 온도변화에 대한 자체적인 부피변화를 최소화하기 위하여 일반금속재질이 아닌 열팽창계수가 1/1,000,000 이하를 만족하는 합금재질을 사용하여야 하며, 각 구속링의 크기 및 두께는 사용자가 부여하고자 하는 구속도를 4.4 (4) 및 (5)에 제시된 계산공식에 따라 결정하도록 한다. 단, 구속링 및 콘크리트 시험체의 높이는 150mm를 적용토록 한다.

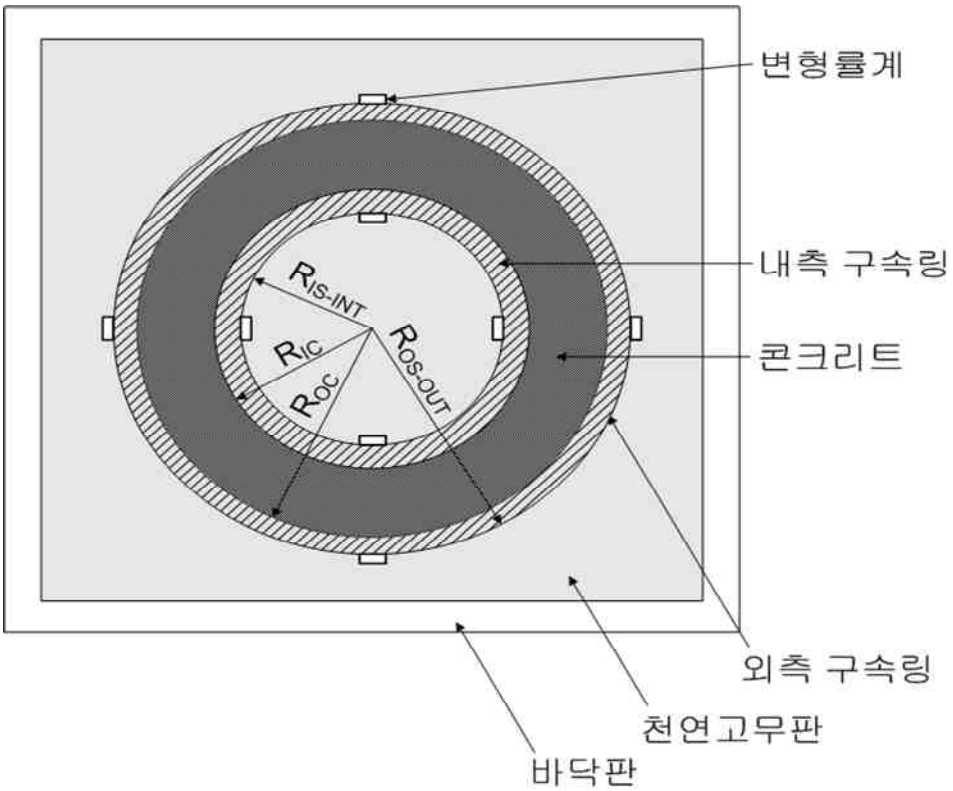


그림 3-2-1-94. 콘크리트 시험체, 구속링 및 받침판 개요 (평면도)

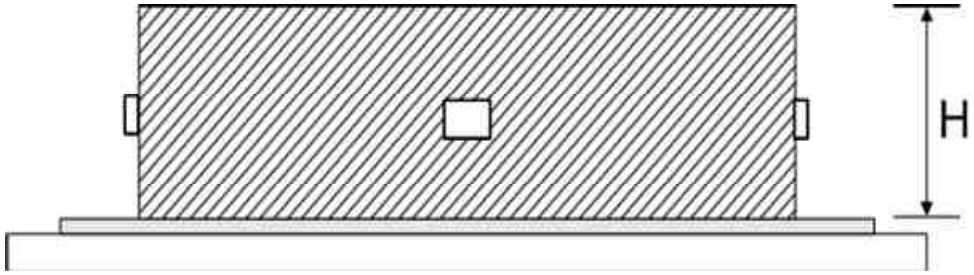


그림 3-2-1-95. 콘크리트 시험체, 구속링 및 받침판 개요 (측면도)

- 콘크리트 시험체 및 구속체를 거치하는 받침판은 시험체 및 구속체가 자유로이 거동할 수 있도록 굴곡이 없는 금속 또는 나무 재질의 판상에 두께 약 1.5mm 이상의 천연고무 재질의 고무판으로 구성된다.

- 구속링을 고무판 상면에 거치한 후에는, 구속링과 고무판 사이의 방수를 위하여 그리스 등을 이용하여 구속체 하단부에 방수처리를 한다.

- 환경챔버는 콘크리트의 단열온도상승을 챔버 내에서 모사할 수 있는 성능을 가져야 한다. 즉, 사용되는 환경챔버는 사전에 수행된 단열온도상승시험으로부터 구하여진 온도상승 변화조건을 10분 당 섭씨 1도 이내의 오차범위내로 모사해 줄 수 있는 성능을 가져야 한다.

- 콘크리트의 수화열로 인한 부피 변화시 수축의 경우에 있어서는 내측에 위치하는 구속링이 구속력을 발휘하며, 콘크리트의 팽창시에는 외측에 위치하는 구속링이 구속력을 발휘하는 방식으로 구성되며, 콘크리트의 부피변화로 인한 구속링의 변형률은 각 구속링에 부착된 변형률 측정센서(각 구속링 당 최소 4개 이상)와 측정값을 기록할 수 있는 데이터로거를 구비하여야 한다.

다. 해상기초 시공용 복합성능 콘크리트 개발 및 현장타설 기술 실용화

(1) 기존 수중불분리 혼화제 성능 평가

(가) 개요

초장대 교량의 경우 비교적 대수심에 기초용 수중콘크리트를 타설할 때 시공성 향상을 위해서는, 수중불분리 혼화제의 성능향상과 배합개선을 통해 수중불분리 콘크리트의 충전성과 유동성을 향상시킨 고유동 수중불분리 콘크리트 개발이 필요한 실정이다. 이에 이 연구에서의 목표를 수중슬럼프 600mm 이상이면서 압축강도비 0.8 이상, 현탁물질액 150mg/ℓ이하(RCD 기초의 경우) 확보하는 것으로 하였다.

한편, 수중불분리 콘크리트가 위와 같은 성능을 확보하기 위해서는 관련 규격에 적합한 수중불분리 혼화제를 선정·사용하는 것이 중요하고 성능향상을 위한 제품 개발 및 배합개선의 방향도 관련규격에 맞춰 진행되어야 한다.

따라서, 본 연구에서는 이 연구에서는 현재 국내 시판되고 있는 수중불분리 혼화제의 성능평가를 통해 목표성능 충족여부에 대한 기술적 수준을 파악할 필요가 있다. 이를 위해 국내제품 일부를 샘플링하여 수중불분리 콘크리트의 품질을 평가함으로써 고유동 수중불분리 콘크리트 개발을 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

(나) 실험개요

① 제품선정 및 실험방법

수중불분리 혼화제의 성능을 평가하기 위하여, 국내 시판되고 있는 수중불분리 혼화제 5개 제품을 선정하여 물-시멘트비 50%인 콘크리트를 제작한 후, 한국콘크리트학회에서 규정한「콘크리트용 수중불분리 혼화제 품질 규준(안)」에 따라, 슬럼프 플로우, 수중분리도와 재령 7일, 28일의 기중 및 수중 압축강도를 측정하여, 기중제작 콘크리트에 대한 수중제작 콘크리트의 압축강도 비를 평가하였다.

② 사용재료 및 배합

본 연구에 사용된 시멘트는 비중이 3.15인 H사 제품의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 잔골재는 낙동강산(경북 안동시) 하천사(밀도 2.60g/cm^3), 굵은골재는 최대치수 20mm인 안동산 부순돌(밀도 2.65g/cm^3)을 사용하였다.

선정된 수중불분리 콘크리트의 품질을 평가하기 위하여 표 3-2-1-23과 같이 콘크리트 배합실험을 하였다. 여기서 제조사별 추천배합을 적용하여 수중불분리 혼화

제와 고성능 감수제의 사용을 결정하였고 성능평가의 기준을 가지기 위해 물-시멘트비는 50%로 고정하여 수중불분리 콘크리트를 제작하였다.

표 3-2-1-23. 콘크리트 배합표

구분	f_{ck} (MPa)	G_{max} (mm)	W/C (%)	S/a (%)	단위량 (kg/m^3)					
					물	시멘트	잔골재	굵은 골재	AWA*	SP
Plain	24	20	50	43	220	440	899	665	-	-
A									2.4	8.86
B									2.5	8.50
C									2.0	10.12
D									2.4	7.92
E									2.5	8.80

* AWA : 수중불분리 혼화제

(다) 실험결과

① 슬럼프 플로우

그림 3-2-1-96은 5개 제품의 수중불분리 혼화제를 사용한 수중불분리 콘크리트에 대한 슬럼프 플로우를 나타낸 것으로, 수중불분리 혼화제를 사용한 콘크리트가 플레인 콘크리트보다 유동성이 좋은 것으로 나타났다. 또한, 수중불분리 혼화제에 따른 슬럼프 플로우는 약 470~540mm의 값을 나타내고 있다. 이는 각 제조사별 사용하는 혼화제의 원재료가 서로 상이하기 때문에 현재 배합에 사용되고 있는 양을 기준으로 분석하기는 어려움이 있다.

② 수중분리도

그림 3-2-1-97 및 그림 3-2-1-98은 수중불분리 콘크리트의 수중분리 저항성을 평가하기 위하여 pH 및 현탁물질량을 나타낸 것으로, pH는 11.4 ~ 11.5, 현탁물질량은 33~81.67mg/ℓ로 측정되었다. 수중불분리 혼화제를 사용한 경우는 플레인 콘크리트보다 pH 및 현탁물질량이 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 수중에서 공시체를 제작할 때 수중불분리 콘크리트의 점성 증가로 시멘트 입자간, 시멘트와 골재 사이의 가교역할을 수반함에 따라 시멘트의 유실 및 재료분리가 적게 일어났기 때

문인 것으로 판단된다. 특히 유동성면에서 540mm의 가장 우수한 성능을 나타내었던 배합 D의 경우에는 현탁물질 기준값인 50mg/ℓ를 상회하고 있다. 현탁물질 기준값을 만족시키기 위해서는 수중불분리 혼화제의 사용량이 증가되어야 하는데, 수중불분리 혼화제 사용량을 증가시키면 유동성은 감소할 것으로 판단된다. 배합 E의 경우에는 현탁물질값이 다른 배합에 비해 가장 낮으면서도 유동성도 약 480mm정도를 나타내고 있어 다른 배합에 비해 성능이 가장 우수한 것으로 나타났다

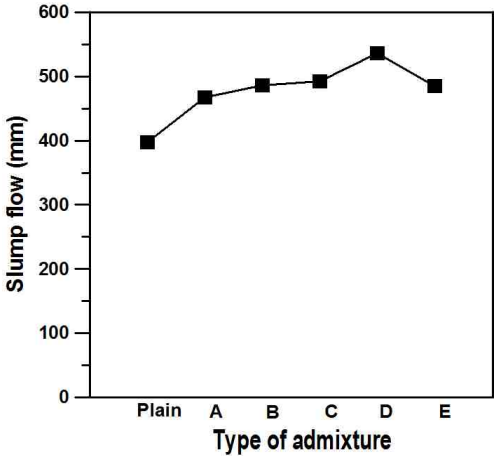


그림 3-2-1-96. 수중불분리 혼화제 종류에 따른 슬럼프 플로우

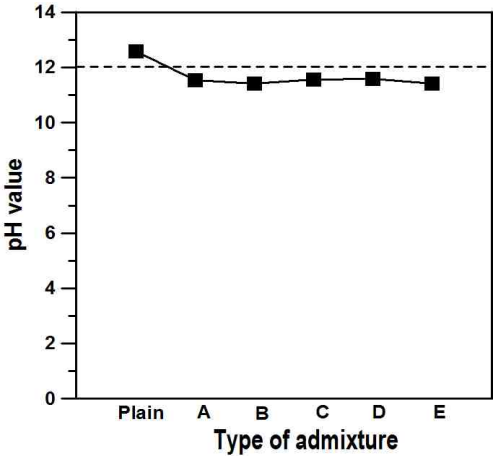


그림 3-2-1-97. 혼화제 종류에 따른 pH

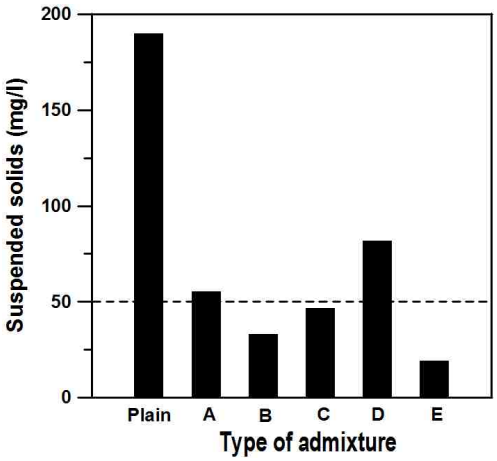


그림 3-2-1-98. 혼화제 종류에 따른 현탁물질량

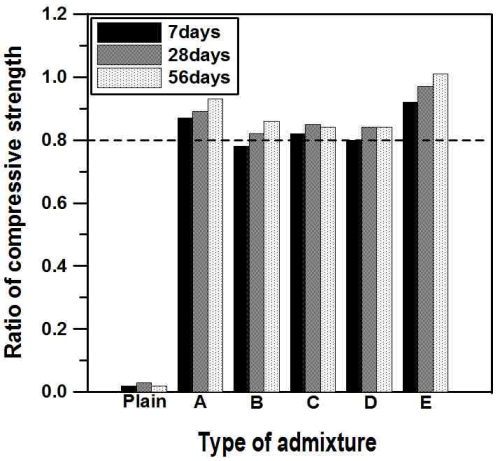


그림 3-2-1-99. 혼화제 종류에 따른 압축강도 비

③ 콘크리트의 압축강도 비

그림 3-2-1-99는 기중제작 콘크리트에 대한 수중제작 콘크리트의 압축강도비를 나타낸 것으로, 수중불분리 혼화제 제품에 따라 압축강도 비는 다소 차이는 있으나 재령 7일, 28일 및 56일의 압축강도 비는 각각 0.78~0.92, 0.82~0.97 및 0.84~1.01로 측정되어, 재령 7일 및 28일에서 각각 0.80 이상의 수중불분리 혼화제 성능 규정을 만족하는 것으로 나타났다. 또한 수중에서 제작한 플레인 콘크리트는 시멘트의 유실로 인해 원활한 수화반응이 이루어지지 않아 강도발현이 거의 없는 것으로 나타났다.

⑤ 실험결과 고찰

품질 특성을 평가한 결과 현재 시판되고 있는 제품으로는 슬럼프 플로우 500mm 정도의 수중불분리 콘크리트 제조가 가능하였으나, 이 연구에서 목표로 하는 수중 슬럼프플로우 600mm 이상을 확보하기에는 다소 어려움이 있다. 압축강도비면에서는 수중불분리 혼화제 제품에 따라 압축강도 비는 다소 차이는 있으나 재령 7일, 28일 및 56일의 압축강도 비는 각각 0.78~0.92, 0.82~0.97 및 0.84~1.01로 측정되어 목표로 하는 압축강도비 0.8이상도 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

따라서 시험에 사용된 전 제품이 한국콘크리트학회의 「콘크리트용 수중 불분리 혼화제 품질 규격(KCI-AD102)」의 규정값을 만족하고 있으며, 전반적으로 E제품의 성능이 가장 우수한 것으로 나타났다. 따라서, 국내 시판되는 E제품에 사용된 성분의 수중불분리 혼화제와 고성능 감수제를 바탕으로 성능을 개선하거나 개발함으로서 고유동 수중불분리 콘크리트의 제작이 가능할 것으로 판단된다.

(2) 고유동 수중불분리 혼화제 시제품 개발

(가) 고성능감수제의 성능 개선

이 연구에서는 수중불분리 콘크리트에 적합한 고성능감수제를 선정하기 위해 기존에 사용하던 멜라민계를 비롯하여 폴리칼본산계와 이 연구에서 기존 폴리칼본산계 고성능감수제를 수중불분리 콘크리트와 적합하도록 성능을 개선한 PC-A를 적용하였다.

표 3-2-1-24와 같은 일반 수중불분리 콘크리트 배합표를 사용하여 유동성을 평가하였다.

표 3-2-1-24. 일반 수중불분리 콘크리트 배합표

구분	설계기준 강도 (MPa)	Gmax (mm)	W/C (%)	S/a (%)	단위량(kg/㎥)					
					W	C	S	G	수중 불분리제	SP
기준	24	20	50	43	220	440	665	899	2.5	변화

그림 3-2-1-100은 고성능감수제 종류에 따른 수중불분리 콘크리트의 유동성을 나타낸 것이다. 그림에서 기존 멜라민계 고성능감수제를 사용한 경우에 비해 폴리칼본산계를 적용한 경우 약 10%의 유동성 증가가 되는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 폴리칼본산계를 적용하더라도 약 500mm의 슬럼프 플로우값을 확보하는데 그치고 있다. 이 연구에서의 성능개선제품인 PC-A를 적용할 경우 약 545mm로 유동성이 향상되는 결과를 나타내었으나 목표치인 600mm 도달에는 아직 미흡한 점이 있어 수중불분리 혼화제의 성능이 개선된 새로운 제품 개발이 필요하다.

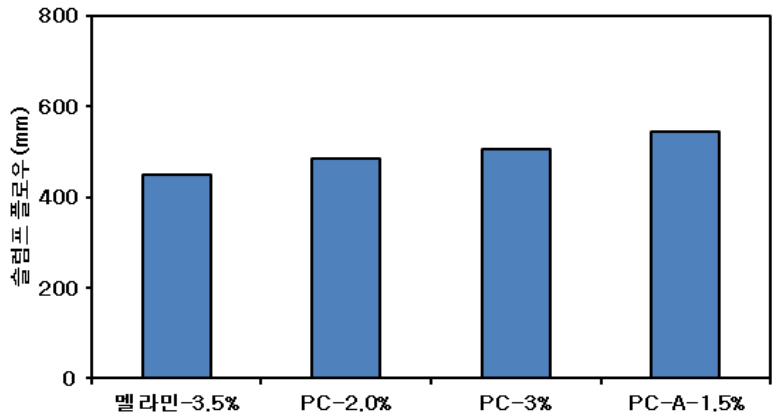


그림 3-2-1-100. 고성능감수제 종류에 따른 슬럼프 플로우

(나) 고유동 수중불분리 혼화제 시제품 개발

① 고유동 수중불분리 혼화제 시제품 개발방향

초장대 교량용 고유동 수중불분리 콘크리트를 효율적으로 배합하기 위해 기존에 비해 매우 성능이 향상된 물질이 필요하다. 이에 기존 셀룰로오스계를 기반으로 아크릴계와 PEO계 특수증점제 등을 일정배합으로 하여 수중불분리 콘크리트의 점성이 증가하면서도 고성능감수제를 첨가하여도 점성을 유지할 수 있는 고유동 수중

불분리 혼화제를 개발하였다. 여기서 물질개발 과정에서 이루어진 내용은 기술이전 문제와 연관되어 있어 생략하도록 한다.

② 고유동 수중불분리 혼화제 시제품 생산

이 연구에서 개발된 고유동 수중불분리 혼화제에 대해 그림 3-2-1-101과 같은 설비를 이용하여 시제품 약 500kg을 생산하여 고유동 수중불분리 콘크리트 최적배합 및 성능평가를 위해 사용하였다. 여기서 생산된 백색분말형 고유동 수중불분리 혼화제 시제품명을 <FLOWMIX HIGH WATER-CON>으로 하였다.



그림 3-2-1-101. 고유동 수중불분리 혼화제 시제품 생산 현황

한편, 개발된 시제품을 상기 배합인 표 3-2-1-20에 적용하여 수중불분리 콘크리트의 유동성을 평가한 결과 규정된 탁도값을 유지하면서 최대 560~570mm를 나타내어 기존 수중불분리 콘크리트에 비해 매우 향상된 유동성을 나타내었지만 목표로하는 600mm에 도달하지 않았다. 그러므로 기존 수중불분리 콘크리트의 배합에 대해 시멘트만을 사용할 것이 아니라 최근 초장대교량에서 요구하는 강도수준 및 시공방법을 고려하여 광물질 혼화재에 대한 사용을 토대로 유동성 향상방안을 검토할 필요가 있다. 따라서 개발된 고유동 수중불분리 혼화제와 기존의 수중불분리 콘크리트 배합개선을 병행한다면 목표성능을 달성할 수 있을 것으로 판단된다.

(3) 고유동 수중불분리 콘크리트 최적배합 개발

(가) 적정 광물질 혼화재의 선정

① 실험개요

이 연구에서 개발된 고유동 수중불분리 혼화제 시제품을 바탕으로 광물질 혼화재를 사용하는 수중불분리 콘크리트 배합개선이 필요하다. 특히, 초장대 교량의 경우, 대부분 해상에 건설되기 때문에 내해수성에 강한 콘크리트 재료를 사용한 수중불분리 콘크리트 시공이 요구되고, 기초형식에 따라서는 수중불분리 콘크리트의 유동성이 크게 향상될수록 공사효율이 크게 개선될 수 있다.

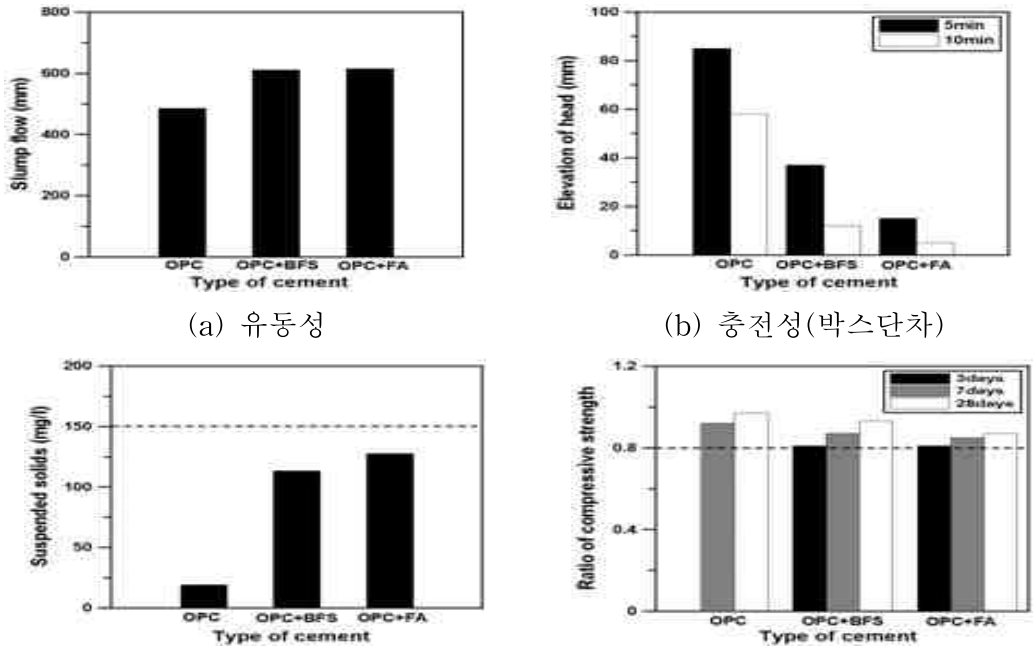
또한 우리나라의 경우 초장대 교량의 기초형식으로 현장타설말뚝(RCD)이 지배적이며 압축강도를 35MPa 수준을 요구하고 있다. 또한 RCD 기초의 경우 수중불분리 콘크리트를 파일내부에 타설하므로 현탁물질의 기준을 토목학회 규준(안)인 현탁물질액 150mg/ℓ이하로 설정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 이 연구에서 개발된 고유동 수중불분리 혼화제 시제품을 기반으로 기중 슬럼프 플로우 600mm 이상의 고유동 수중불분리 콘크리트를 제조하기 위해 고로슬래그 미분말과 플라이애쉬와의 비교 검토를 하여 적정의 광물질 혼화재를 적용할 필요가 있다. 평가를 위해 수중불분리 혼화제의 적정사용량을 결정하여 고유동 수중불분리 콘크리트를 제작한 후, 굳지 않은 콘크리트 및 경화 콘크리트의 특성을 평가하였다.

② 실험방법

유동성, 충전성 및 재료분리 저항성 등이 우수한 고유동 수중불분리 콘크리트의 최적 배합을 도출하기 위하여 고로슬래그 미분말과 플라이 애쉬의 비교를 통해 혼화재를 선정하고자 하였다.

③ 실험결과 분석 및 고찰

광물질 혼화재 혼화재 사용에 따른 수중불분리 콘크리트의 유동성 확보 여부 및 혼화재를 선정하기 위해 단위시멘트량 550kg/㎥에 대해 고로슬래그는 40%, 플라이애쉬는 20%로 각각 시멘트에 대해 치환하여 제조한 결과 아래 그림3-2-1-72와 같은 결과를 얻었다. 그림 3-2-1-102에서와 같이 광물질 혼화재를 사용할 경우 슬럼플 플로우 600mm를 확보하였고, 현탁물질과 압축강도비 등을 고려하였을 때 고로슬래그 미분말을 사용하는 것이 유리한 것으로 나타났다. 또한 고로슬래그 미분말을 사용할 경우 콘크리트의 내해수성 증가에 보다 유리한 것으로 알려져 고유동 수중불분리 콘크리트의 내해수성 증가와 유동성 향상에 기여할 것으로 판단된다.



(a) 유동성 (b) 충전성(박스단차)

(c) 현탁물질량 (d) 압축강도비

그림 3-2-1-102. 혼화재 선정을 위한 실험결과

(나) 고로슬래그 미분말을 사용한 고유동 수중불분리 혼화제의 사용량 결정

① 실험개요 및 방법

선정된 고로슬래그 미분말을 기준으로 목표압축강도 35MPa를 고려하여 단위결합재량 550 및 600kg/㎥에 대해서 목표 슬럼프 플로우를 600mm로 정하여 시멘트량의 40%를 고로슬래그 미분말로 치환하여 증점제 사용량에 따라 콘크리트를 제작하였다. KCI-AD102(콘크리트용 수중 불분리성 혼화제 품질 규격)에 의해 제작된 콘크리트의 슬럼프 플로우, 수중분리도, 수중기중 강도비 등의 품질을 증점제 사용량(0.5~1.0%)에 따라 평가하였다.

② 실험결과

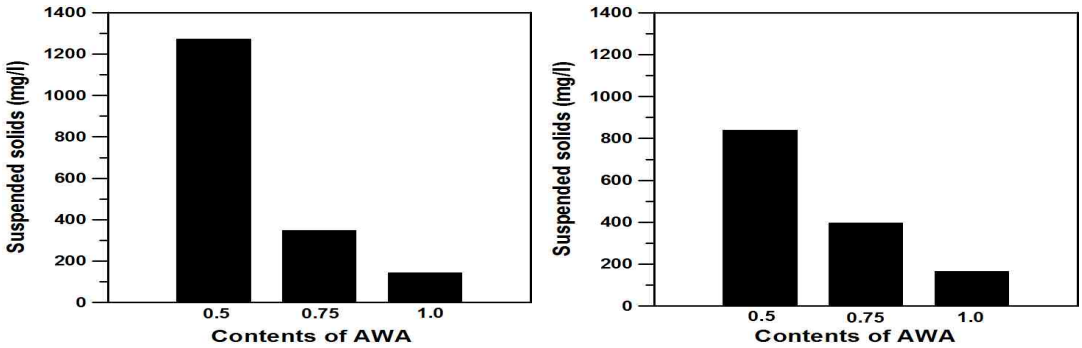
㉮ 슬럼프 플로우 및 충전성

고로슬래그 미분말을 사용한 고유동 수중불분리 콘크리트의 슬럼프 플로우는 단위시멘트량 550kg/㎥ 보다 600kg/㎥로 증가할 때 슬럼프플로우가 목표 플로우값(600mm 이상)을 다소 증가시키는 것으로 나타났고, 충전성을 나타내는 박스단차는 증점제의 사용량이 단위수량의 0.75% 이상인 경우만 35mm 이하로 나타나, 고유동

수중불분리 콘크리트의 원활한 충전성을 위해서는 최소 증점제 사용량이 존재하는 것으로 나타났다.

㉯ 수중분리도

증점제의 사용량에 따른 pH는 고로슬래그 미분말을 혼입함에 따라 상대적으로 단위시멘트량의 감소로 인해 pH 12 이하로 나타났으나, 현탁물질량은 그림 3-2-1-103과 같이 증점제의 사용량이 감소할수록 콘크리트 점성 저하 및 고로슬래그 미분말의 특성상 증가하는 것으로 나타났다.

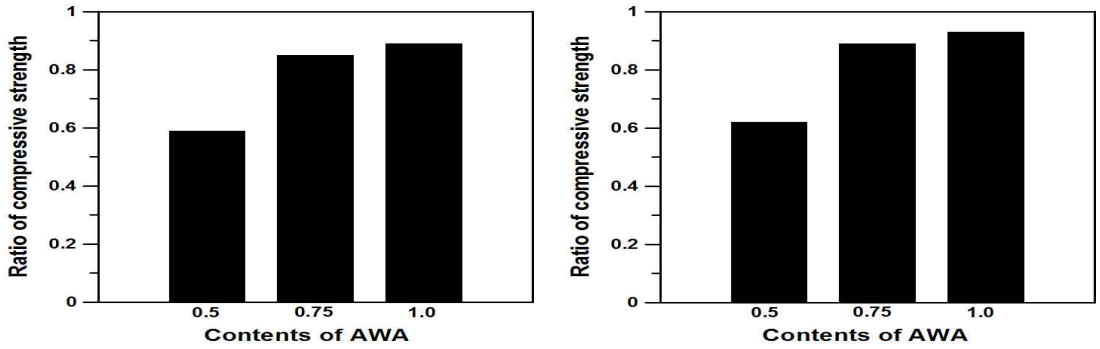


(a) B=550kg/㎥ (a) B=600kg/㎥

그림 3-2-1-103. 증점제 사용량에 따른 현탁물질량

㉰ 콘크리트의 압축강도비

그림 3-2-1-104는 단위결합재량 및 증점제의 사용량에 따른 기중제작 콘크리트에 대한 수중제작 콘크리트의 압축강도비를 나태낸 것으로, 단위결합재량에 관계없이 증점제의 사용량이 0.75% 이상인 경우 수중불분리 혼화제 품질 기준인 0.80 이상으로 나타났다. 증점제 사용량 0.50%인 경우 점성 저하로 인한 수중분리도 증가로 압축강도비가 가장 낮은 것으로 나타났다.



(a) B=550kg/㎥ (a) B=600kg/㎥

그림 3-2-1-104. 증점제 사용량에 따른 압축강도비

(다) 고유동 수중불분리 콘크리트의 최적배합 선정

① 최적배합

실험결과, 유동성 및 충전성을 동시에 개선하기 위해서는 최소 증점제 사용량이 존재하는 것으로 나타났고, 현탁물질량은 증점제 사용량이 감소할수록 콘크리트 점성 저하 및 고로슬래그 미분말을 사용하는 배합특성상 증가하는 것으로 나타났다.

기중제작 콘크리트에 대한 수중제작 콘크리트 압축강도비는 증점제 사용량 0.75% 이상인 경우, 수중불분리 혼화제 품질 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 다음 표 3-2-1-25에 이 연구에서 제시하는 최적배합을 나타내었고 여기서 제시한 배합을 바탕으로 현장에 적용될 때는 사용되는 재료의 영향을 고려한 배합을 적용하는 것이 요구된다.

표 3-2-1-25. 고유동 수중불분리 콘크리트 최적배합

설계기준 강도 (MPa)	단위결합재량 (kg/㎥)	AWA 첨가량 (W×%)	W/B (%)	S/a (%)	단위량(kg/㎥)					AWA (kg/㎥)	SP제 (B×%)
					W	C	BFS	S	G		
35	550	1.00	37	46	204	330	220	696	833	2.0	2.5

② 개발된 최적배합에 대한 수중슬럼프 비교 실험

이 연구에서 목표로 하는 고유동 수중불분리 콘크리트는 수중슬럼프 플로우

600mm 이상, 수중/기중 압축강도비가 0.8이상, 현탁물질액 150mg/ℓ이하를 확보하는 것이다.

한편, 고로슬래그 미분말을 사용할 경우 수중불분리 콘크리트의 내해수성 증가와 유동성 향상에는 장점이 있으나 시멘트만을 사용한 경우에 비해 현탁물질이 크게 발생하는 단점이 있다. 그러므로 수중불분리 콘크리트에 고로슬래그 미분말을 사용하고 기중 슬럼프 플로우 600mm 이상을 확보하는 유동성을 가지면서 현탁물질 기준을 만족시키는 것은 매우 어려운 기술을 확보하는 것이라 할 수 있다.

현재 수중불분리 콘크리트의 슬럼프 플로우를 측정하는 방법은 기중 슬럼프 플로우 측정방법이 유일하다. 그러나, 여기서는 竹中 寬 가 제안한 수중유동시험장치(竹中 寬 외3인, 2007)를 응용하여 슬럼프 플로우실험을 그림 3-2-1-105와 같은 장치를 사용하여 5분간 측정하여 평가하고자 하였다.

실험결과 그림 3-2-1-106과 같이 기존 수중불분리 콘크리트가 기중 슬럼프플로우 약 480mm을 나타내었으나 수중슬럼프플로우를 측정한 결과 약 470m를 나타내었고 수중슬럼프플로우나 기중슬럼프플로우가 유사한 값을 나타내는 것을 알 수 있었다. 이 연구에서 개발한 고유동 수중불분리 콘크리트는 수중 슬럼프 플로우가 630mm를 나타내었고 현탁물질량은 80~100mg/ℓ이하 값을 나타내 이 연구에서 목표로 하는 수중슬럼프 플로우 600mm 이상 현탁물질량 150mg/ℓ이하를 확보하였다. 다음절의 수중불분리 콘크리트의 역학적 평가에서 수중/기중 압축강도비가 0.9 이상을 나타내 목표치인 0.8 이상을 확보하였다.

따라서, 이 연구에서 개발된 고유동 수중불분리 혼화제를 사용하고 고로슬래그 미분말을 사용한 배합을 이용하여 압축강도 35MPa를 확보하면서 수중 슬럼프플로우 630mm, 수중/기중 압축강도비 0.8이상, 현탁물질액 100mg/ℓ이하를 나타내는 고유동 수중불분리 콘크리트 최적배합을 이용함으로써 해상 기초 구조물의 안정성 및 품질향상에 기여할 것으로 판단된다.

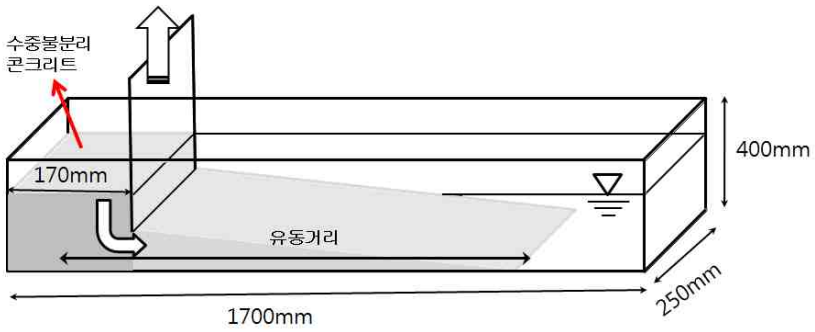


그림 3-2-1-105. 수중 슬럼프 플로우 측정장치



(a) 일반 수중분분리 콘크리트



(b) 개발된 고유동 수중불분리 콘크리트

그림 3-2-1-106. 수중 슬럼프 플로우 비교

(4) 개발된 수중불분리 콘크리트 역학적 특성 평가

(가) 실험개요

고유동 수중불분리 콘크리트의 역학적 특성을 평가하기 위하여 단위결합재량 550kg/㎥과 수중불분리 혼화제를 단위수량의 1.0%를 사용하여 기중제작 및 수중제작 콘크리트를 제작하였으며, 이들은 재령 28일에 압축강도, 탄성계수, 인장강도 및 휨강도를 측정하였다.

(나) 실험결과 및 분석

① 압축강도 및 탄성계수

그림 3-2-1-107은 고유동 수중불분리 콘크리트의 재령 28일 압축강도를 나타낸 것이다. 수중제작 및 기중제작 콘크리트의 압축강도는 각각 45.11MPa 및 47.31MPa로 나타났다. KCI-AD102의 재령 28일 수중제작 콘크리트의 압축강도

25MPa 이상을 만족하는 것으로 나타났으며, 압축강도비의 경우 0.96으로 평가되어 0.80이상을 만족하는 것으로 나타났다.

그림 3-2-1-108은 고유동 수중불분리 콘크리트의 탄성적계수를 나타낸 것으로, 수중제작 및 기중제작 콘크리트의 탄성계수는 각각 31,985 및 32,123MPa로 나타나, 수중제작으로 인한 정탄성계수의 저하는 거의 없는 것으로 나타났다.

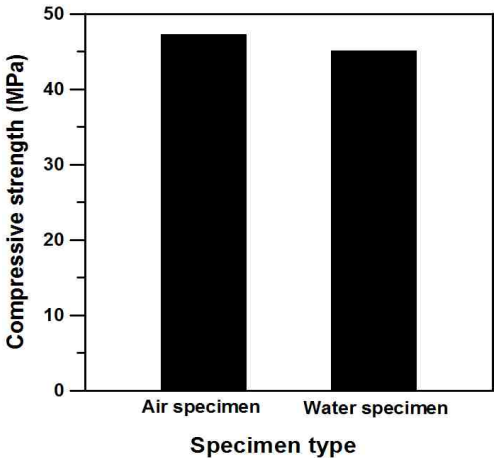


그림 3-2-1-107. 압축강도 측정결과 (B=550kg/㎥)

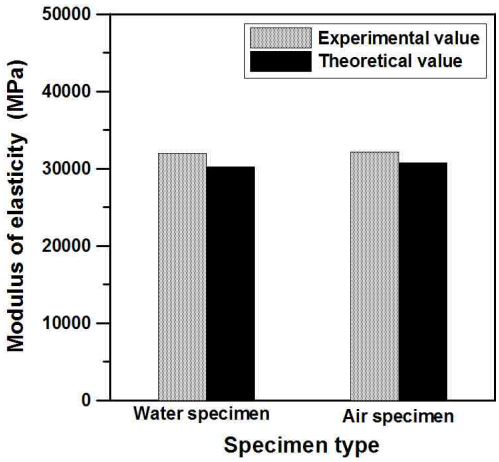


그림 3-2-1-108. 탄성계수 측정결과 (B=550kg/㎥)

② 인장 및 휨강도

그림 3-2-1-109와 그림 3-2-1-110은 수중제작 및 기중제작 콘크리트의 인장강도와 휨강도를 나타낸 것이다. 인장강도는 각각 2.83MPa 및 3.72MPa로 나타났으며, 재령 28일 압축강도에 대한 인장강도 비는 각각 1/17 및 1/13로 나타났다. 휨강도는 각각 6.80MPa 및 6.31MPa로 나타났고, 재령 28일 압축강도에 대한 휨강도 비는 각각 1/7 및 1/8로 나타났다.

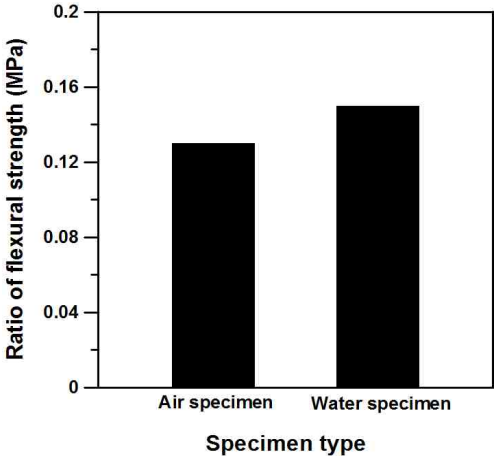


그림 3-2-1-109. 휨강도 측정결과 (B=550kg/㎥)

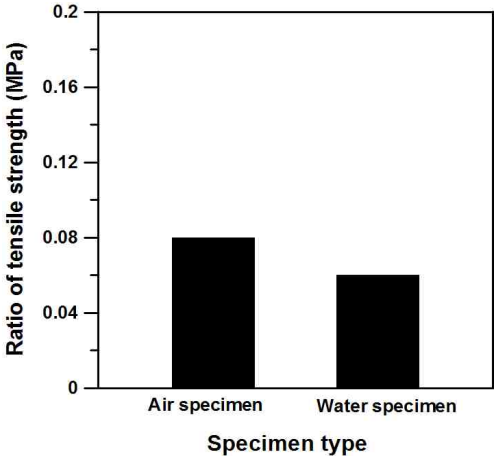


그림 3-2-1-110. 인장강도 측정결과 (B=550kg/㎥)

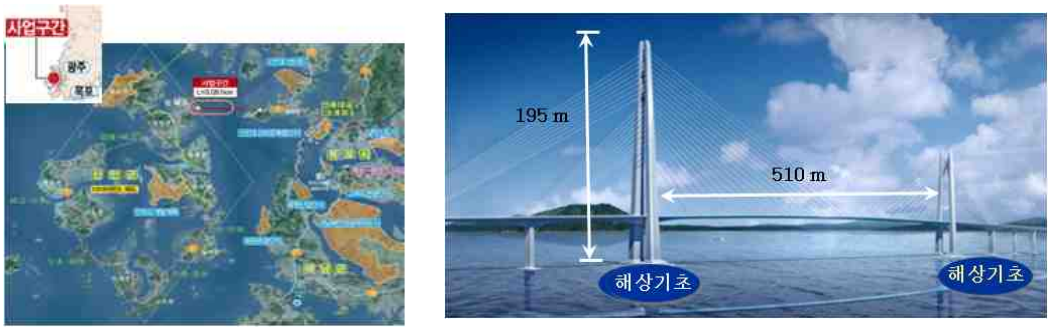
(5) 고유동 수중불분리 콘크리트 Test-bed

이 연구에서 개발한 수중불분리 혼화제 시제품과 최적배합을 기반으로 한 고유동 수중불분리 콘크리트를 그림 3-2-1-111과 같이 실제 공사구간에 Test-bed로 적용하고자 하였다. 적용현장은 (주)대우건설에서 추진하고 있는 압해-암태 1공구 새천년 대교 공사(사장교) 구간 RCD파일 구간이다. 다음은 Test-bed를 진행하기 위해 실시한 과정을 요약하여 나타내었다.

(가) 추진일정

① 대상교량 현황

- 사업명 : 암해-암태 1공구 RCD 해상 기초 공사
- 형 식 : 대구경 RCD 현장타설 파일 기초
- 규 모 : 주탑 및 접속교 기초 포함 총 270 여개
- 제 원 : 최대 구경 2,500mm RCD 파일



(a) 대상구간 (b) 조감도

3-2-1-111. Test-bed 대상교량 현황

② 일정

- 현장시험배합 및 성능검증 : 2011. 4. 28 ~ 5. 4
- 해상 배처플랜트 현장 시험적용 배합 : 2011. 9. 28 ~ 10. 15
- 현장 Test bed 적용 : 2011. 10. 18 ~ (진행 중)

③ 설계변경사항

㉮ 슬럼프 플로우 500mm의 수중불분리 콘크리트를 600mm 슬럼프 플로우로 설계 변경

- 연구개발 고유동 수중불분리 콘크리트 배합의 현장 적용성 평가
- 현장 사용 고로슬래그 대상으로 변경 배합 결정
- 압축강도 (28일 기준 50MPa), 유동성 (슬럼프 플로우 610mm) 확인
- 압축강도비 0.9이상 확보



그림 3-2-1-112. Test-bed를 위한 현장실험 현황

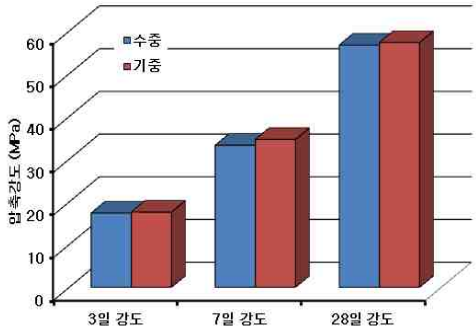


그림 3-2-1-113. Test-bed를 위한 현장배합 압축강도 결과

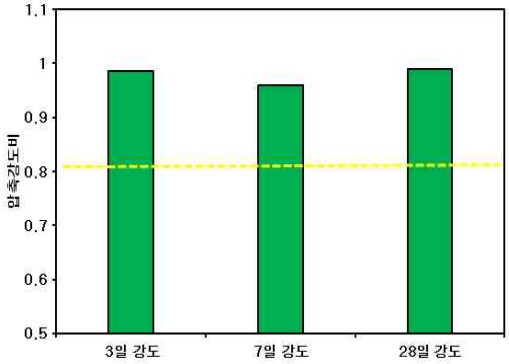


그림 3-2-1-114. Test-bed를 위한 현장배합 압축강도 비 결과

㉯ 경제성 분석

압축강도 35MPa 기준수중불분리 콘크리트 재료비의 13% 절감효과를 확인할 수 있었고 자세한 내용을 표 3-2-1-26에 나타내었다.

표 3-2-1-26. 고유동 수중불분리 콘크리트 경제성 분석

항 목				기존 수중불분리 콘크리트	개발 수중불분리 콘크리트	
					실험실	현장 해상 (B/P(T/B))
배합표	목표강도 (Mpa)			35	35	35
	목표 슬럼프플로우 (mm)			500 정도	600 이상	600 이상
	W/B (%)			42	37	37
	단위량 (kg/㎥)	W		210	204	204
		C		500	330	-
		고로슬래그 시멘트		-	-	550
		BFS		-	220	-
		S		636	696	696
		G		859	833	833
		수중 불분리제	기존품	2.5	-	-
			개발품	-	2.1	2
	고성능감수제 (B×%)		기존 (B type)	2.5	-	-
			기존 (C type)	-	2.5	2.5
제조 단가 (원/㎥)				134,961	120,217	118,916
단가 저감액 (원/㎥)				-	14,744	16,045
단가 저감율 (%/㎥)				-	12.3	**13.5**

(나) 현장지원 및 Test-bed 적용

실내실험 및 해상 B/P(Batcher Plant)에서의 실험을 바탕으로 Test-bed에 고유동 수중불분리 콘크리트를 적용하였다. 현장타설에 앞서 현장지원을 통해 현장골재 사정에 따라 해상 배처 플랜트 제조용 수중불분리 콘크리트 배합 수정을 하였고 트레미관 막힘 현상 유무 모니터링을 통해 고유동 수중불분리 콘크리트의 품질향상에 주력하였다. 다음은 이 연구에서 개발된 고유동 수중불분리 콘크리트 현장 적용 과정을 나타낸 것이다.



그림 3-2-1-115. 현장 Test-bed 현황

(6) 고유동 수중불분리 콘크리트 현장 타설 프로세스 개발

해상에서 파일을 설치하기 위한 시공장비 구성은 크게 잭업바지(Jackup barge)와 가이드프레임(Guide frame) 조합 또는 해상크레인과 핀파일가이드자켓(Pinpile guide jacket) 조합 두 가지로 나눌 수 있다.

(가) 잭업바지와 가이드프레임 조합

① 잭업바지 설치

잭업바지가 정위치에 위치한 것을 확인한 후 고정용 잭업바지 앵커를 이용하여 잭업바지를 고정한다.

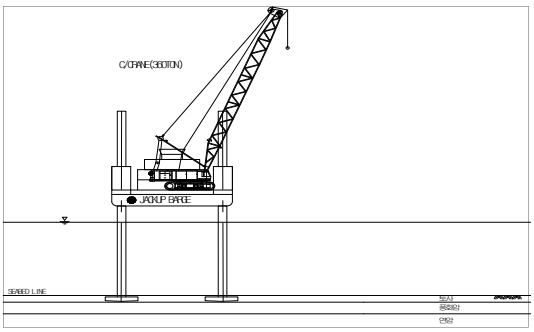
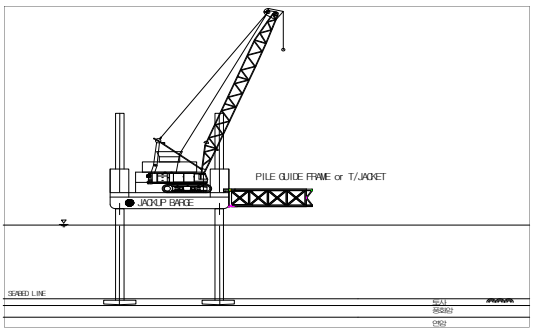




그림 3-2-1-116. 잭업바지 설치

② 가이드 프레임 설치

강관의 항타 또는 지반의 천공 시 정밀한 수직도를 확보하기 위하여 가이드 프레임을 설치한다.



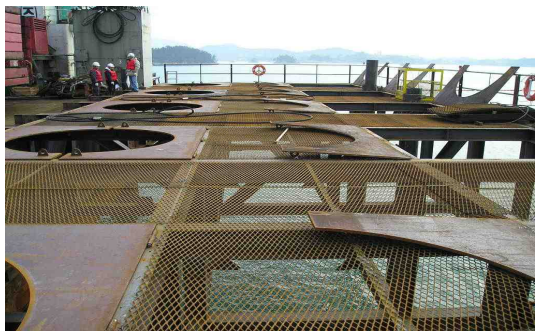


그림 3-2-1-117. 가이드프레임 설치

③ 희생강관 설치

육상으로부터 바지 등으로 이송된 희생강관을 크롤러크레인을 이용하여 가이드프래임에 거치시킨다.

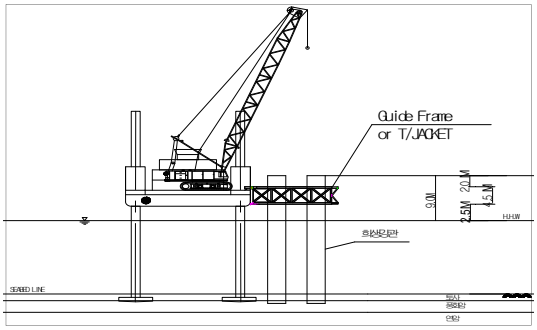




그림 3-2-1-118. 희생강관 설치

④ 굴착

해저지반(암반)을 천공하기 위하여 RCD(Reverse Circulation Drill) 또는 PRD(Percussion Rotary Drill) 장비를 희생강관 내부에 삽입한다.

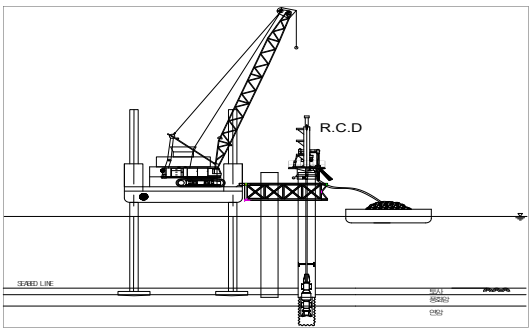




그림 3-2-1-119. 굴착

⑤ 철근망 설치 및 콘크리트 타설

강관 내부에 철근망을 삽입한 후 트레미관(Tremi pipe)을 설치하여 수중 콘크리트를 타설한다.

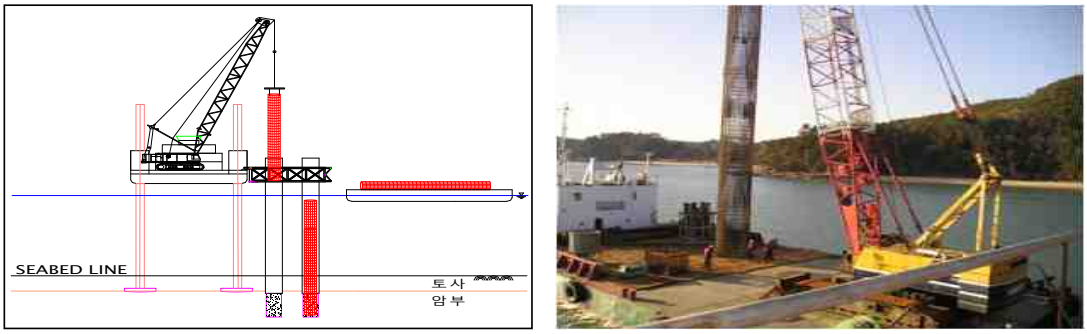


그림 3-2-1-120. 철근망 설치

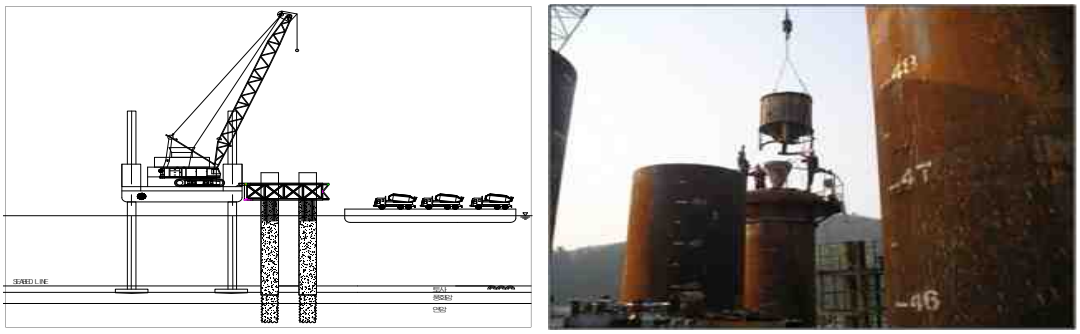


그림 3-2-1-121. 콘크리트 타설

(나) 해상크레인과 핀파일가이드자켓 조합

① 해상크레인 이동 및 설치

파일을 설치할 위치에 해상크레인을 이동시켜 정위치에 고정시킨다.

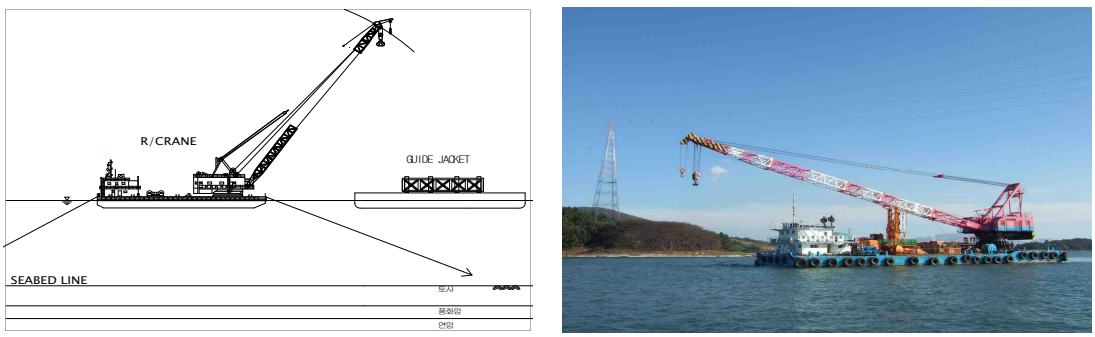


그림 3-2-1-122. 해상크레인 이동 및 설치

② 가이드자켓 설치

가이드자켓은 해상크레인으로 설치위치로 이동한 후 바이브로해머를 이용하여 가이드프레임 모서리에 위치한 다수의 핀파일을 박아 정위치에 고정시킨다.

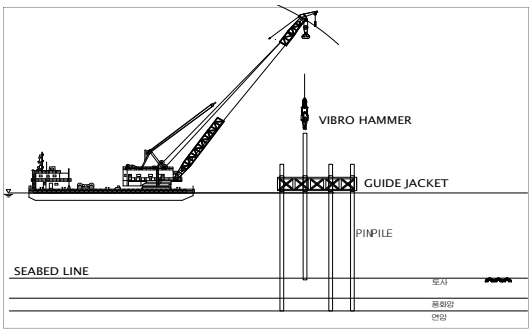




그림 3-2-1-123. 가이드자켓 설치

③ 희생강관 설치

해상크레인을 이용하여 설치된 가이드프레임에 희생강관을 거치시키고 바이브로해머 등을 이용하여 희생강관을 지반에 관입시킨다.

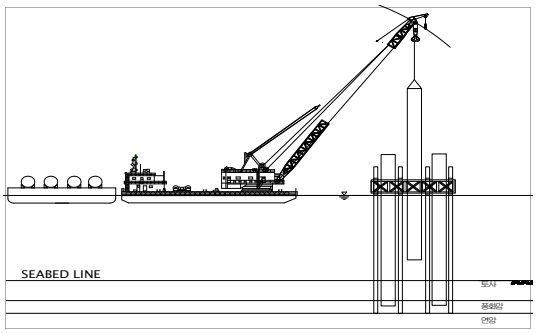




그림 3-2-1-124. 희생강관 설치

④ 굴착

해상크레인을 이용하여 희생강관 내부에 천공장비를 삽입하여 지반 및 암반을 천공한 후 압축공기를 불어넣어 공내에 남아있는 슬라임을 깨끗이 제거한다.

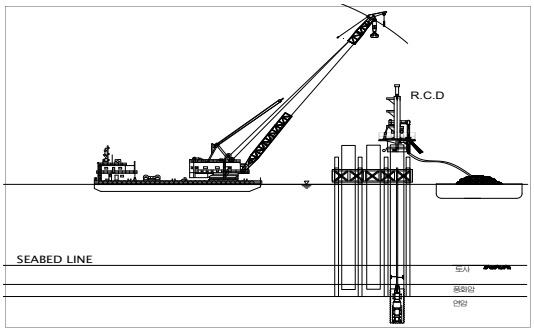




그림 3-2-1-125. 굴착

⑤ 철근망 설치 및 콘크리트 타설

해상크레인을 이용하여 강관 내부에 철근망을 삽입하고 콘크리트를 타설한다.

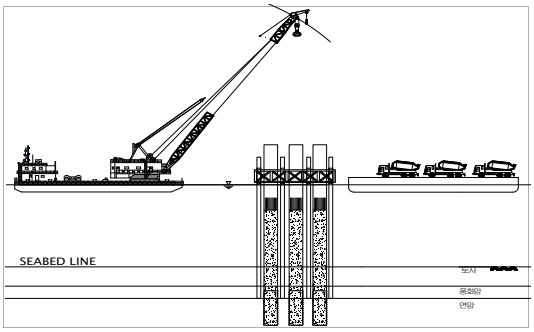




그림 3-2-1-126. 철근망 설치 및 콘크리트 타설

(7) 고유동 수중불분리 콘크리트 최적배합 개발

(가) 적정 광물질 혼화재의 선정

- 실험개요

이 연구에서 개발된 고유동 수중불분리 혼화제 시제품을 바탕으로 광물질 혼화재를 사용하는 수중불분리 콘크리트 배합개선이 필요하다. 특히, 초장대 교량의 경우, 대부분 해상에 건설되기 때문에 내해수성에 강한 콘크리트 재료를 사용한 수중불분리 콘크리트 시공이 요구되고, 기초형식에 따라서는 수중불분리 콘크리트의 유동성이 크게 향상될수록 공사효율이 크게 개선될 수 있다.

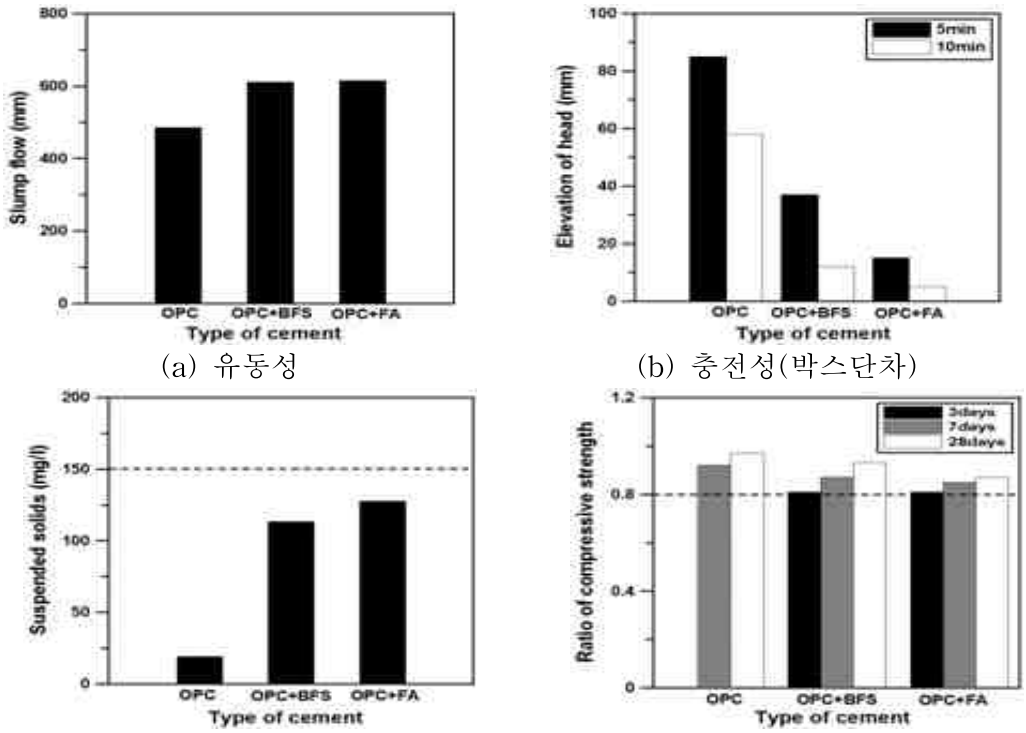
또한 우리나라의 경우 초장대 교량의 기초형식으로 현장타설말뚝(Reverse Circulation Drill Method, 이하 RCD) 공법이 지배적이며 현장타설말뚝에 적용되는 수중불분리 콘크리트의 배합 압축강도는 35MPa 수준을 요구하고 있다. 또한 RCD 기초의 경우 수중불분리 콘크리트를 파일내부에 타설하므로 현탁물질의 기준을 토목학회 규준(안)인 현탁물질액 150mg/ℓ이하로 설정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 이 연구에서 개발된 고유동 수중불분리 혼화제 시제품을 기반으로 기중 슬럼프플로 600mm 이상의 고유동 수중불분리 콘크리트를 제조하기 위해 고로슬래그 미분말과 플라이애시를 비교 검토하여 적정의 광물질 혼화재를 적용할 필요가 있다. 평가를 위해 수중불분리 혼화제의 적정사용량을 결정하여 고유동 수중불분리 콘크리트를 제작한 후, 굳지 않은 콘크리트 및 경화 콘크리트의 특성을 평가하였다.

- 실험방법

유동성, 충전성 및 재료분리 저항성 등이 우수한 고유동 수중불분리 콘크리트의 최적배합을 도출하기 위하여 고로슬래그 미분말과 플라이애시의 비교를 통해 혼화재를 선정하고자 하였다.

- 실험결과 분석 및 고찰

광물질 혼화재 사용에 따른 수중불분리성 콘크리트의 유동성 확보 여부 및 혼화재를 선정하기 위해 단위시멘트량 550kg/㎥에 대해 고로슬래그 미분말은 40%, 플라이애시는 20%로 각각 시멘트에 대해 치환하여 제조한 결과, 아래 그림 3-2-1-127과 같은 결과를 얻었다. 즉, 광물질 혼화재를 사용할 경우 슬럼프플로 600mm를 확보하였고, 현탁물질과 압축강도비 등을 고려하였을 때 고로슬래그 미분말을 사용하는 것이 유리한 것으로 나타났다. 또한 고로슬래그 미분말을 사용할 경우 콘크리트의 내해수성 증가에 보다 유리한 것으로 알려져 고유동 수중불분리성 콘크리트의 내해수성 증가와 유동성 향상에 기여할 것으로 판단된다.



(a) 유동성 (b) 충전성(박스단차)

(c) 현탁물질량 (d) 압축강도비

그림 3-2-1-127. 혼화재 선정을 위한 실험결과

(나) 최적배합비 도출을 위한 고유동 수중불분리성 혼화제의 사용량 결정

- 실험개요 및 방법

선정된 고로슬래그 미분말을 기준으로 목표 압축강도 35MPa를 고려하여 목표슬럼프플로는 600mm이상, 물-결합재비 37%, 단위결합재량 550kg/㎥에 대해서 시멘트량의 40%를 고로슬래그 미분말로 치환하여 증점제와 감수제의 사용량을 변화시켜 최적 배합비 도출을 위한 최적 혼화제 사용량을 결정하기 위해 표 3-2-1-27과 같이 배합비를 정하였다. 한국콘크리트학회에서 제정한 KCI-AD102에 따라 슬럼프플로, 수중분리도(현탁물질량 및 pH) 및 충전성(그림 3-2-1-128)을 평가하였다.



(a) 박스단차(각형)



(b) 박스단차(U형)

그림 3-2-1-128. 충전성 평가

표 3-2-1-27. 고유동 수중불분리성 콘크리트 배합표

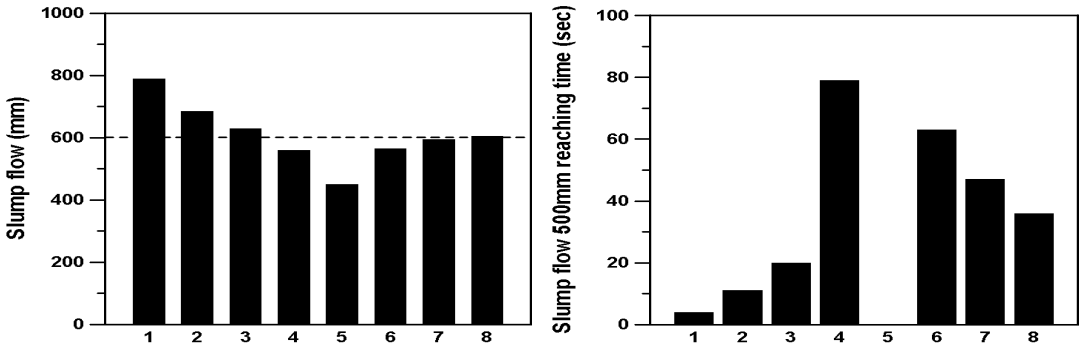
번호	G_{max}	Target slump flow (mm)	Target air content (%)	W/B (%)	B (kg/㎥)	S/a (%)	Unit mass(kg/㎥)					AWA (W*%)	SP (B*%)
							W	C	BFS	S	G		
1	25	600이상	3.5±0.5	37	550	45	202	330	220	676	846	0.50	2.50
2												0.75	
3												1.00	
4												1.25	
5												1.50	
6	25	600이상	3.5±0.5	37	550	45	202	330	220	676	846	1.00	1.50
7													2.00
8													3.00

- 실험결과

·유동성

그림 3-2-1-129는 증점제와 감수제의 사용량에 따른 기중 슬럼프플로와 슬럼프플로 500mm 도달시간을 나타낸 것이다. 감수제량을 고정시키고 증점제의 영향만을 고려한 슬럼프플로는 450~790mm로써, 증점제의 량이 증가할수록 슬럼프플로는 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 감수제의 첨가량이 일정할 때 증점제의 첨가량이 많을수록 콘크리트의 점성이 증가함에 따라 유동성이 감소하기 때문으로 판단되며, 슬럼프플로 500mm 도달시간 또한 증점제량이 증가할수록 도달시간이 증가하는 것으로 나타났다.

증점제량을 고정시키고 감수제의 영향만을 고려한 슬럼프플로는 감수제의 첨가량이 증가할수록 슬럼프플로는 증가하고 500mm 도달시간은 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 감수제의 영향으로 유동성이 개선되었기 때문으로 판단된다.



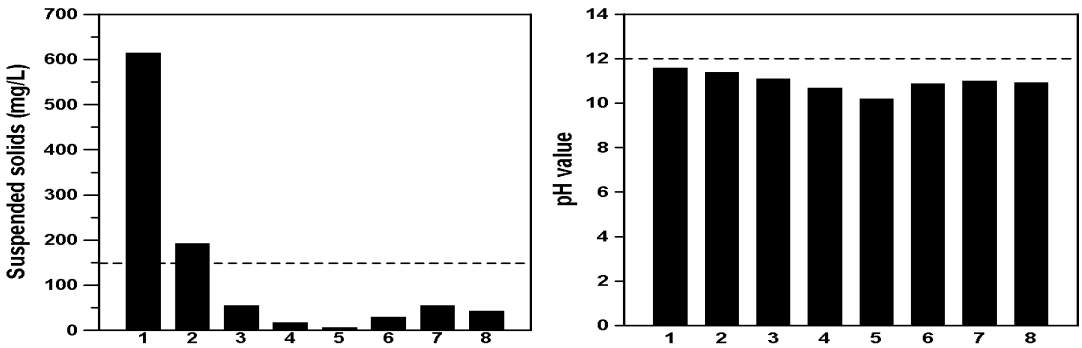
(a) 슬럼프플로 (b) 슬럼프플로 500mm 도달시간

그림 3-2-1-129. 혼화제 사용량에 따른 유동성

·수중분리도

그림 3-2-1-130은 증점제와 감수제의 사용량에 따른 고유동 수중불분리성 콘크리트의 현탁물질량 및 pH를 나타낸 것이다. 현탁물질량의 경우 증점제의 양이 증가할수록 콘크리트의 점성이 증가하여 현탁물질량은 감소하는 것으로 나타났으며, 감수제의 첨가량이 증가할수록 현탁물질량은 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 감수제의 영향으로 인하여 콘크리트의 점성 저하와 고로슬래그 미분말의 자체특성에 기인된 것으로 판단된다. 따라서, 고유동 수중불분리성 콘크리트의 수중분리도는 증점제의 사용량에 매우 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

고로슬래그 미분말은 pH에 영향을 미치지는 않으나, 많은 양을 혼입함에 따라 상대적으로 단위시멘트량의 감소로 인해 pH는 모두 12 이하로 나타났다.

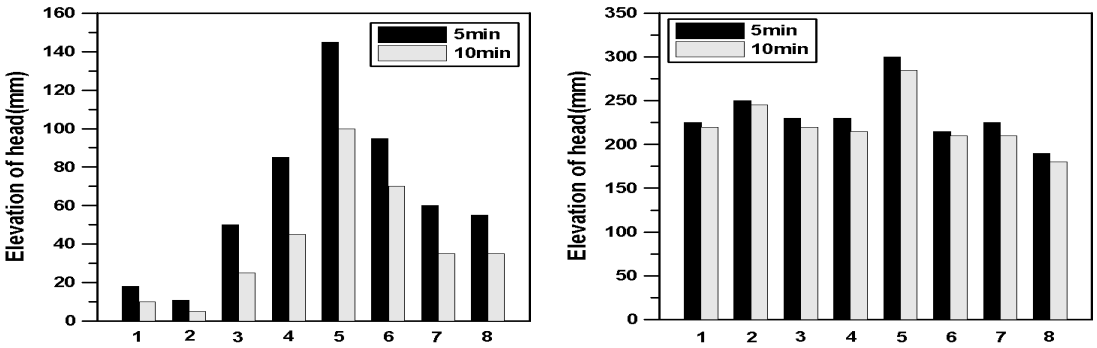


(a) 현탁물질량 (b) pH

그림 3-2-1-130. 혼화제 사용량에 따른 수중분리도

·충전성

그림 2-2-36은 수중불분리성 콘크리트의 충전성을 나타내는 것으로 박스높이차가 작을수록 충전성이 우수한 것을 나타낸다. 박스높이차의 경우 증점제 첨가량이 증가할수록 박스 높이 차는 큰 것으로 나타나 점성으로 인하여 충전성이 다소 감소하는 것으로 나타났다. 반대로 감수제의 첨가량이 증가할수록 박스 높이 차는 감소하는 경향을 보이는데 이는 감수제의 영향으로 콘크리트의 점성 저하와 유동성이 다소 증가되었기 때문으로 판단된다. U형 박스의 경우는 철근통과량 시험으로 각형과 동일한 경향을 보이나 전반적으로 각형에 비해 단차가 적은 것으로 나타났다.



(a) 박스단차(각형) (b) 박스단차(U형)

그림 3-2-1-131. 혼화제 사용량에 따른 충전성

(다) 고유동 수중불분리성 콘크리트의 최적배합비 선정

- 최적배합

고유동 수중불분리성 콘크리트의 배합실험 결과, 유동성 및 충전성을 동시에 개선하기 위해서는 최소 증점제 사용량이 존재하는 것으로 나타났고, 현탁물질량은 증점제 사용량이 감소할수록 콘크리트 점성 저하하여 현탁물질이 증가하고 고로슬래그 미분말을 사용하는 경우 시멘트만 사용하는 경우보다 현탁물질이 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 혼화제 최적 첨가량에 따른 고유동 수중불분리성 콘크리트의 최적배합은 표 3-2-1-28과 같고, 여기서 제시한 배합을 기준으로 현장에 적용될 때는 사용되는 재료의 영향을 고려한 현장배합으로 수정하여야 한다.

표 3-2-1-28. 고유동 수중불분리성 콘크리트 최적 배합표

Specified concrete strength (MPa)	G_{max}	Target slump flow (mm)	Target air content (%)	W/B (%)	B (kg/㎥)	S/a (%)	Unit mass(kg/㎥)					AWA (W*%)	SP (B*%)
							W	C	BFS	S	G		
35	25	600이상	3.5±0.5	37	550	45	202	330	220	676	846	1.00	2.50

- 개발된 최적배합에 대한 수중슬럼프 비교 실험

이 연구에서 목표로 하는 고유동 수중불분리성 콘크리트는 수중슬럼프플로 600mm이상, 수중/기중 압축강도비가 0.8이상, 현탁물질액 150mg/ℓ이하를 확보하는 것이다.

한편, 고로슬래그 미분말을 사용할 경우 수중불분리성 콘크리트의 내해수성 증가와 유동성 향상에는 장점이 있으나 시멘트만을 사용한 경우에 비해 현탁물질이 크게 발생하는 단점이 있다. 그러므로 수중불분리성 콘크리트에 고로슬래그 미분말을 사용하고 기중 슬럼프플로 600mm 이상을 확보하는 유동성을 가지면서 현탁물질 기준을 만족시키는 것은 매우 어려운 기술을 확보하는 것이라 할 수 있다.

현재 수중불분리성 콘크리트의 슬럼프플로를 측정하는 방법은 기중 슬럼프플로 측정방법이 유일하다. 그러나, 여기서는 竹中 寛 가 제안한 수중유동시험장치(竹中 寛 외3인, 2007)를 응용하여 슬럼프플로 실험을 그림 3-2-1-132와 같은 장치를 사용하여 5분간 측정하여 평가하고자 하였다.

배합실험 결과, 기존 수중불분리 콘크리트가 기중 슬럼프플로 약 550mm을 나타내었으나 수중 슬럼프플로를 측정한 결과 약 580mm(5분)를 나타내어, 수중 슬럼프플로는 기중 슬럼프플로와 유사한 값을 나타내는 것을 알 수 있었다. 이 연구에서 개발한 고유동 수중불분리성 콘크리트는 그림 2-2-38과 같이 수중 슬럼프플로가 630mm(5분)를 나타내었고 현탁물질량은 55mg/ℓ 값을 나타내 이 연구에서 목표로 하는 수중슬럼프플로 600mm 이상, 현탁물질량 150mg/ℓ 이하를 확보하였다. 다음 절에서 수중/기중 압축강도비가 0.9이상을 나타내 목표치인 0.8이상을 확보하였다.

따라서, 이 연구에서 개발된 고유동 수중불분리성 혼화제를 사용하고 고로슬래그 미분말을 사용한 배합을 이용하여 압축강도 35MPa를 확보하면서 수중 슬럼프플로 630mm, 수중/기중 압축강도비 0.8이상, 현탁물질액 100mg/ℓ 이하를 나타내는 고유동 수중불분리성 콘크리트의 최적배합을 이용함으로써 해상 기초 구조물의 시공성 및 품질향상에 기여할 것으로 판단된다.

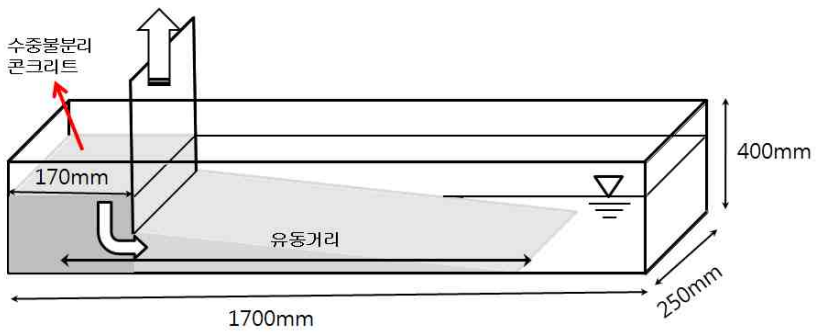


그림 3-2-1-132. 수중 슬럼프플로 측정장치



(a) 일반 수중불분리 콘크리트



(b) 개발된 고유동 수중불분리 콘크리트

그림 3-2-1-133. 수중 슬럼프플로 비교

(8) 단위결합재량에 따른 고유동 수중불분리성 콘크리트의 특성 평가

- 실험개요

단위결합재량에 따른 최적배합에 대해서 고유동 수중불분리성 콘크리트의 특성을 평가하기 위하여 표 3-2-1-29와 같이 및 기존배합(A)과 단위결합재량을 450~600kg/㎥으로 변화시켜 한국콘크리트학회에서 제정한 KCI-AD102에 따라 슬럼프플로, 수중분리도(현탁물질량 및 pH) 및 충전성을 평가하고, 기중제작 및 수중제작 콘크리트를 제작(그림 3-2-1-134)하였으며, 이들은 재령 28일에 압축강도 및 염소이온 확산계수를 평가하였다.



그림 3-2-1-134. 기중 및 수중 콘크리트 공시체 제작

표 3-2-1-29. 단위결합재량에 따른 최적배합

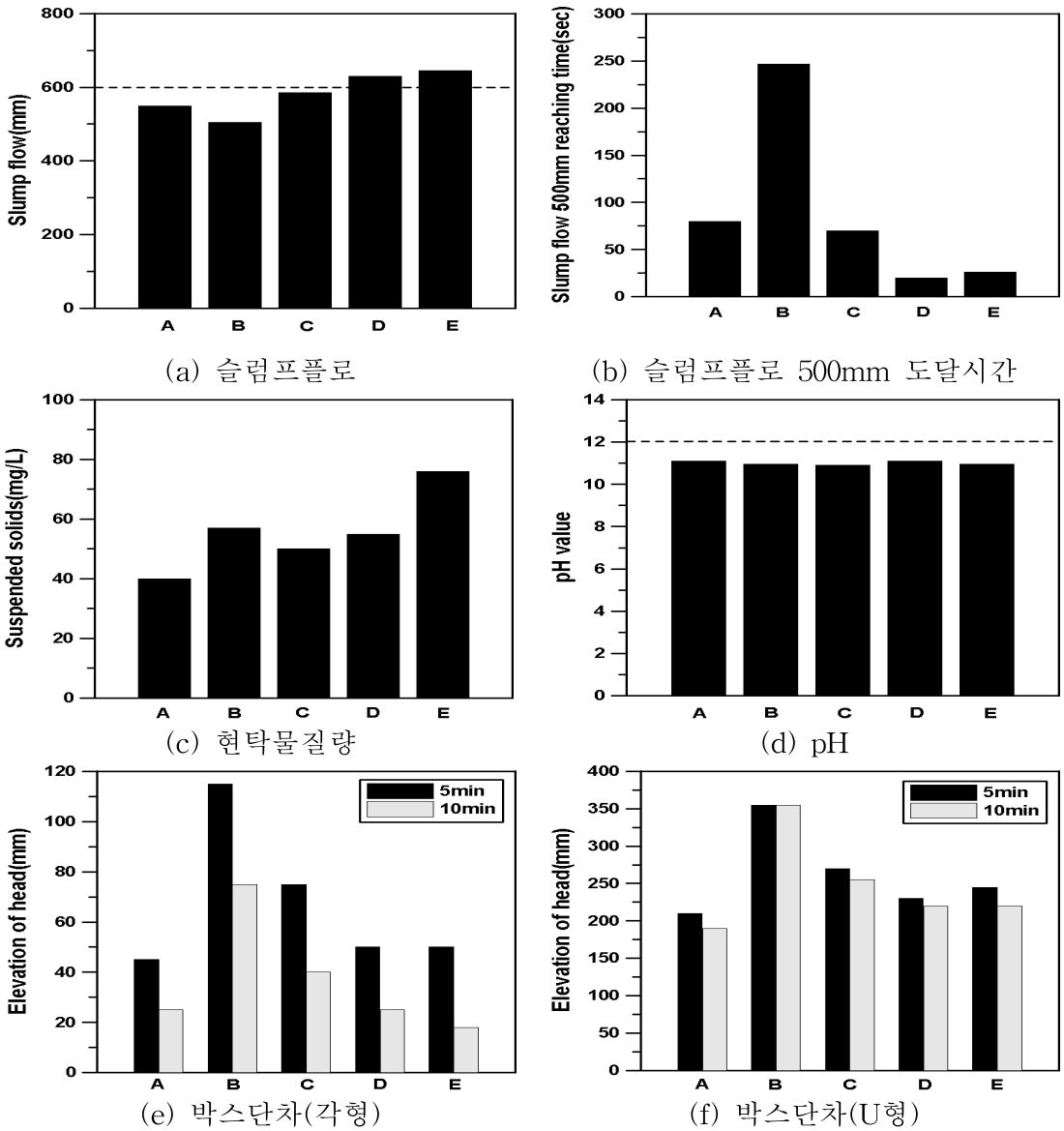
번호	G_{max}	Target slump flow (mm)	Target air content (%)	W/B (%)	B (kg/㎥)	S/a (%)	Unit mass(kg/㎥)					AWA (W*%)	SP (B*%)
							W	C	BFS	S	G		
A (기존)	25	600이상	3.5±0.5	50	440	43	220	440	0	665	899	2.0	1.13
B	25	600이상	3.5±0.5	37	450	45	165	270	180	757	947	2.5	1.0
C					500		183	300	200	717	897		
D (최적)					550		202	330	220	676	846		
E					600		220	360	240	636	796		

- 실험결과 및 분석

· 굳지않은 콘크리트의 특성

그림 3-2-1-135는 기존배합과 단위결합재량에 따른 최적배합의 굳지 않은 콘크리트의 특성을 나타낸 것이다. 슬럼프플로의 경우 단위결합재량이 증가할수록 크게

나타났으며, 500mm 도달시간 또한 단위결합재량 600kg/㎥을 제외하고는 도달시간이 짧아지는 것으로 나타났다. 현탁물질량은 단위결합재량이 증가함에 따라 고로슬래그 미분말의 양이 많아져 증가하는 경향을 보이며, pH는 12이하로 거의 일정한 값을 나타냈다. 박스단차 또한 단위결합재량 600kg/㎥을 제외하고는 단위결합재량이 증가할수록 충전성이 양호함을 볼 수 있다. 이와 같은 결론으로 유동성, 수중분리도 및 충전성 등을 고려하면 단위결합재량 550kg/㎥이 최적배합인 것으로 나타났다.



(a) 슬럼프플로 (b) 슬럼프플로 500mm 도달시간

(c) 현탁물질량 (d) pH

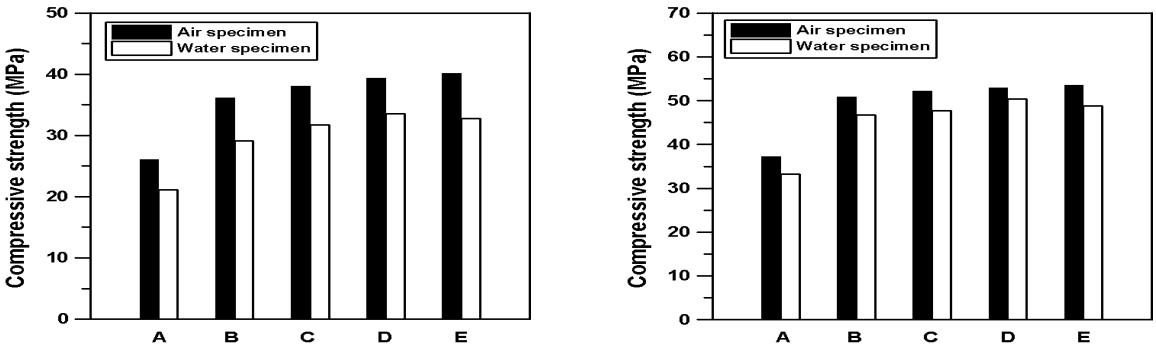
(e) 박스단차(각형) (f) 박스단차(U형)

그림 3-2-1-135. 고유동 수중불분리성 콘크리트의 특성

· 압축강도

그림 3-2-1-136은 고유동 수중불분리성 콘크리트의 재령 7일 및 28일 압축강도를 나타낸 것이다.

그림과 같이 KCI-AD102의 재령 28일 수중제작 콘크리트의 압축강도 35MPa 이상을 만족하는 것으로 나타났으며, 재령 및 단위결합재량이 증가함에 따라 압축강도도 증진되는 것으로 나타났는데, 이는 단위수량의 감소와 단위시멘트량의 증대 및 고로슬래그 미분말의 잠재수경성 반응에 의한 것으로 판단된다.



(a)7일 기중·수중 제작 공시체 압축강도 (b)28일 기중·수중 제작 공시체 압축강도

그림 3-2-1-136. 재령 7일 및 28일 압축강도

· 압축강도비

그림 3-2-1-137은 단위결합재량에 따른 기중제작 콘크리트에 대한 수중제작 콘크리트의 압축강도비를 나태낸 것으로, 단위결합재량에 관계없이 증점제의 사용량이 0.75% 이상인 경우 수중불분리성 혼화제 품질 기준인 0.80 이상으로 나타났다. 단위결합재량에 따라 차이는 있으나 압축강도 비는 거의 비슷한 것으로 나타났다.

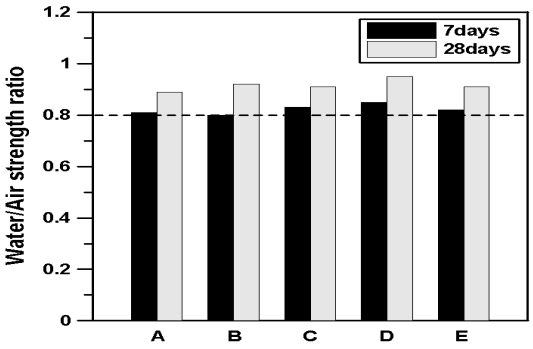


그림 3-2-1-137. 재령 7일 및 28일 수중/기중 압축강도비

·염소이온 확산계수 평가

개요

해상교량과 같은 대형 토목구조물의 콘크리트 구조물에 대해서는 설계부터 염해에 대하여 내구수명을 확보하기 위해 염소이온 침투해석을 수행하고 있다. 해양환경에 건설되는 콘크리트 구조물의 가장 중요한 내구성 저하 인자는 콘크리트 내부로 침투확산 된 염소이온에 의한 철근의 부식, 즉 염해이며 기타 열화 요인에 비해 그 손상 정도나 발생 빈도 면에서 매우 심각한 것으로 알려져 있다.

콘크리트 내의 염소이온 침투 확산 특성은 구조물의 위치 및 환경에 따라 확산, 침투 및 흡수 등이 복합적으로 작용할 뿐만 아니라 콘크리트의 확산 특성 평가 시 장기간의 시험시간이 소요되는 어려움이 있다. 이에 따라 단기간에 염소이온 확산계수를 평가하기 위한 전기화학적 촉진실험방법에는 Andrade 방법, Dhir 방법, Tang 방법 및 NT BUILD 492의 방법 등 많은 연구가 이루어지고 있으나, 시험방법 별로 용액의 농도 및 종류, 시편의 두께, 시험시간 등이 서로 달라 표준화된 시험법은 북유럽에서 규격화되어 있는 NT BUILD 492 방법 외에는 아직 마련되어 있지 않은 실정이다.

NT BUILD 492 방법은 콘크리트 시편에 흐르는 전류를 측정하여 콘크리트의 저항특성에 따라 적용전압 및 실험시간을 결정할 뿐만 아니라 24시간 정도면 염소이온 침투깊이로부터 확산계수를 평가할 수 있어 최근 많이 쓰이고 있는 방법이다.

이 연구에서는 NT BUILD 492 방법에 의해 기존배합 및 최적배합 고유동 수중불분리 콘크리트를 제작하여 염소이온 확산계수를 측정하여 내구성 평가를 수행하였다.

실험방법

기존 및 최적 배합의 공시체를 수중 및 기중에서 제작하여 재령일까지 표준양생시킨 후 전기화학적 촉진시험법인 NT BUILD 492 방법으로 염소이온 확산계수를 측정하였다. NT BUILD 492 실험방법은 비정상상태의 전기적 이동 실험으로부터 콘크리트, 모르타르 및 시멘트 등으로 구성된 재료의 염소이온 확산계수를 결정하는 방법으로, 확산 셀은 그림 3-2-1-138과 같이 구성하고, 콘크리트 시편을 50mm로 절단하여 진공용기에서 3시간동안 진공처리를 한다. 모든 시편을 침지시키기 위하여 포화 수산화칼슘 용액을 채운 후 추가로 1시간 동안 진공을 유지한다. 그 후 포화 수산화칼슘용액에 18시간 침지시킨 후 양극(+)에는 0.3M NaOH 수용액을, 음극(-)에는 10% NaCl 수용액으로 채우고 30V의 설정전압으로 초기 전류값(I_{30V})을 측정한다.

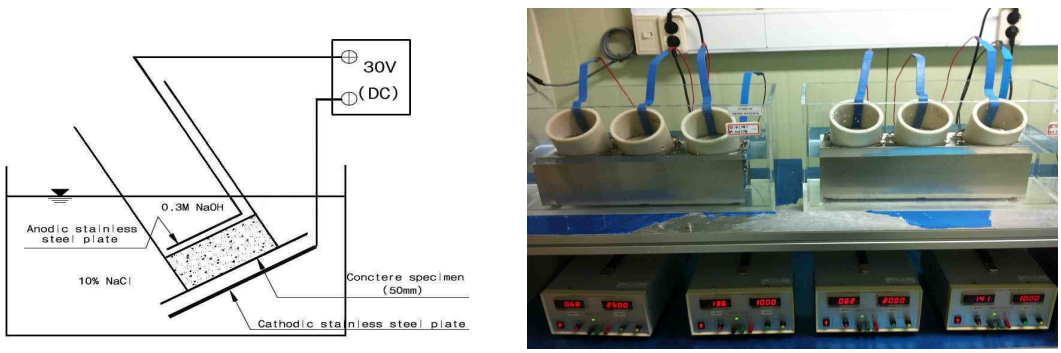


그림 3-2-1-138. NT BUILD 492 확산 셀 상세 및 장치 구성

표 3-2-1-30과 같이 초기 전류값의 범위를 결정하여 적용전압을 조정하고 전류에 따른 적절한 시간을 선택하여 전위차를 이용한 염소이온 확산계수 실험을 실시한다.

실험 후 공시체를 2개의 조각으로 할렬하고, 할렬면에 0.1N AgNO3 용액을 분무

하여 시편의 변색부가 나타나면, 그림 3-2-1-139와 같이 10mm 간격으로 중앙에서 양단으로 침투깊이를 측정한다.

표 3-2-1-30. 적용 전압과 적용 시간

Initial current I_{30V} (with 30V) (mA)	Applied voltage U (after adjustment) (V)	Possible new initial current I_0 (mA)	Test duration t (hour)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30	$40 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$50 \leq I_0 < 75$	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	$60 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	$60 \leq I_0 < 90$	24
$180 \leq I_0 < 360$	10	$60 \leq I_0 < 120$	24
$I_0 \geq 360$	10	$I_0 \geq 120$	6

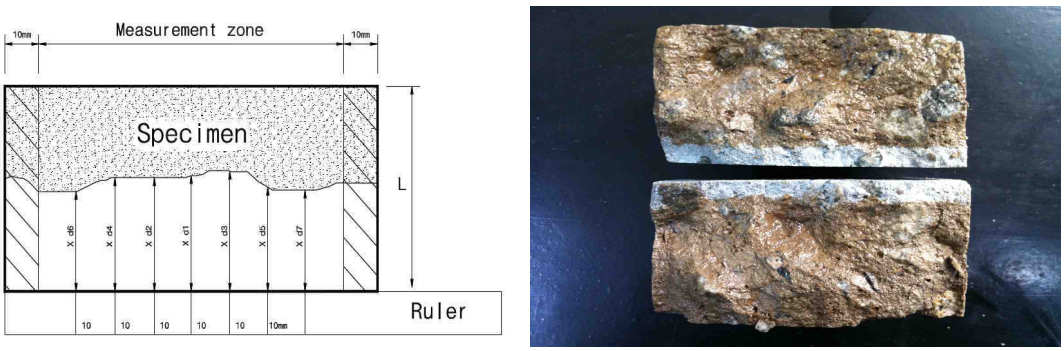


그림 3-2-1-139. 염소이온 침투깊이 측정

염소이온 침투깊이로부터 다음 식을 사용하여 확산계수를 구할 수 있다.

$$D = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{x_d - \alpha\sqrt{x_d}}{t} \quad (2\text{-}2\text{-}1)$$

여기서,

$$E = \frac{U-2}{L} \quad (2\text{-}2\text{-}2)$$

$$\alpha = 2\sqrt{\frac{RT}{zFE}} \cdot erf^{-1}\left(1 - \frac{2c_d}{c_0}\right) \quad (2\text{-}2\text{-}3)$$

D : 염소이온 확산계수(㎡/s)

z : 염소이온 원자가의 절대값($z=1$)

F : 패러데이 상수(9.648×104, J/(V · mol))

U : 적용 전압의 절대값(V)

R : 기체상수(8.314, J/(K · mol))

T : 양극용액에서 초기 및 최종 온도의 평균값(K)

L : 시편의 두께(m)

x_d : 염소이온 침투깊이의 평균값(m)

t : 실험 시간(sec)

erf^{-1} : error function의 역

c_d : 변색부에서의 염소이온 농도(OPC 콘크리트의 경우, c_d=0.07)

c_0 : 음극용액에서 염소이온 농도(c_0=2N)

여기서, $erf^{-1}\left(1 - \frac{2\times 0.07}{2}\right) = 1.28$로 간단하게 정리하여 간편식을 사용하여 다음 식과 같이 염소이온 확산계수를 구할 수 있다.

$$D = \frac{0.0239(273+T)L}{(U-2)t}\left(x_d - 0.0238\sqrt{\frac{(273+T)Lx_d}{U-2}}\right) \quad (2\text{-}2\text{-}4)$$

D : 비정상상태의 염소이온 확산계수(×10-12, ㎡/s)

U : 적용 전압의 절대값(V)

T : 양극용액에서 초기 및 최종 온도의 평균값(℃)

L : 시편의 두께(mm)

x_d : 염소이온 침투깊이의 평균 값(mm)

t : 실험 시간(hour)

· Life-365 프로그램에 의한 내구성 평가

미국 Life-365 Consortium에서는 염해에 대한 수치 모델을 적용하여 콘크리트 구조물의 내구수명 예측 및 보수를 실시하는 경우에 생애주기 비용 분석(LCCA)을 수행할 수 있는 Life-365 프로그램을 개발하였으며, Life-365의 염해에 대한 내구성 예측 모델의 개념은 다음과 같다.

a. 부식 발생 개시 시간의 예측 t_i(Initiation period)

b. 강재의 부식이 허용 성능 저하 한계에 도달하는 시간의 예측 t_p (Propagation period) 여기서, 최초 보수 시기 $t_r = t_i + t_p$이다.

c. 최초 보수 시기 후의 보수 일정의 결정

d. 최초 콘크리트 비용과 보수 비용을 기초로 한 생애주기비용 산정

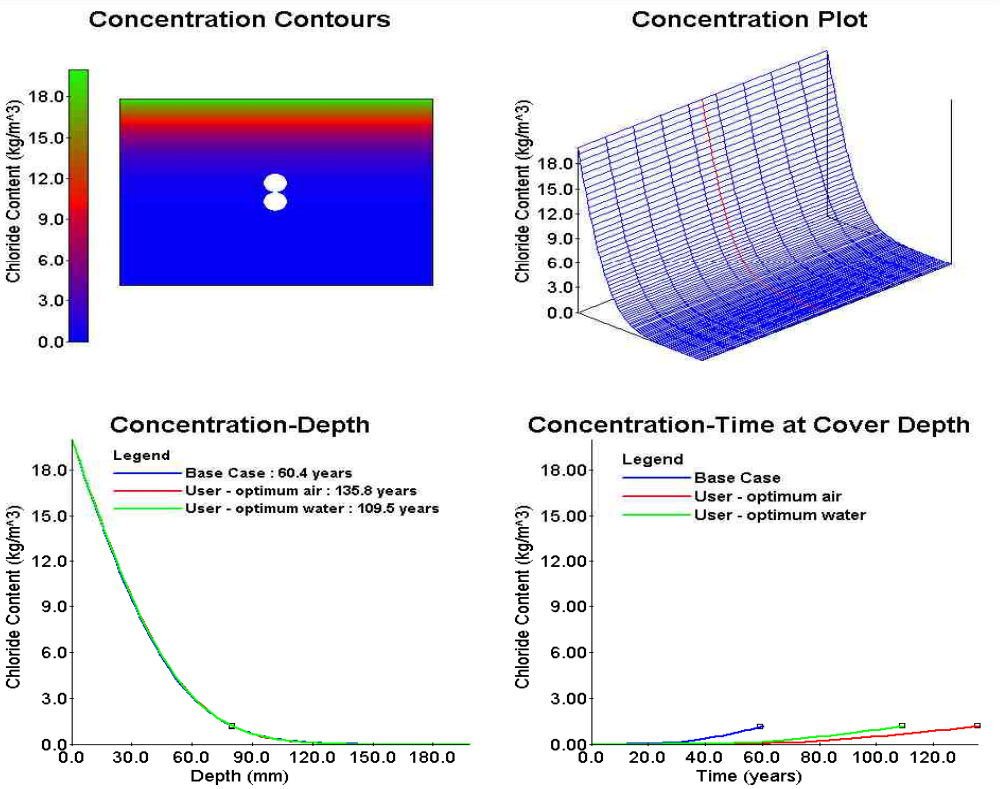


그림 3-2-1-140. Life-365 program

부식 개시 기간 예측

부식 개시 기간 t_i는 콘크리트 피복을 통하여 철근 위치에 염화물 이온이 축적되어 강재 부식이 발생되는 시기이며, 즉 임계 염소이온 농도 C_t가 콘크리트 피복 x_d에 도달한 시기를 말한다. Life-365에서는 기본적으로 염소이온의 확산을 Fick의 제 2법칙을 이용하여 염소이온의 침투를 계산한다. 특이한 사항은 염소이온 확산계수가 시간과 온도의 함수로 나타나며 확산계수는 다음 식을 이용하여 산정한다. 확산계수는 30년까지 타당한 것으로 입증되어 있다.

$$D(t) = D_{ref}\left(\frac{t_{ref}}{t}\right)^m \qquad (2\text{-}2\text{-}5)$$

여기서, $D(t)$: 시간 t에서의 확산계수

D_{ref} : 기준 시간 t_{ref}에서의 확산계수, 일반적으로 28일

m : 배합에 따라 정해지는 재령계수

또한 확산은 온도에 매우 민감하기 때문에 합리적인 염소이온 침투 예측을 위해서는 실험에 의해 확산계수를 측정하거나 또는 경험식에 의해 확산계수를 추정한 경우 이를 온도에 대해 보정해야 한다. 확산계수와 온도와의 관계는 다음 식과 같이 표현된다.

$$D(T) = D_{ref} \exp\left[\frac{U}{R} \bullet \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (2\text{-}2\text{-}6)$$

여기서, D_{ref} : 기준 시간, 기준 온도에서의 확산계수

T_{ref} : 기준 온도(℃), 일반적으로 20℃

U : 확산 활성화 에너지 $(35{,}000\, j/mol)$

R : 기체상수 $(8.314\, j/K \bullet mol)$

T : 절대 온도($^{\circ}K$)

- 부식 개시 기간을 구하기 위한 입력 변수

a. 표면 염소이온 설정에 있어서는 최대 표면 염소이온 농도 C_s를 정해 놓고 있으며, 지역에 따라 C_s에 도달하는 기간을 정하여 사용하고 있다.

b. 온도는 그 지역의 기온 자료를 이용한다.

c. Life-365에 의한 콘크리트 내구수명 평가에서 사용되는 재령 28일의 염소이온 확산계수 예측 모델은 침지실험에 의한 확산계수 연구 결과를 이용하여 물-시멘트비(W/C)에 따른 재령 28일의 염소이온 확산계수를 다음 식과 같이 제안하고 있다.

28일 염소이온 확산계수 :

$$D_{28} = 1 \times 10^{(-12.06 + 2.40\, W/C)} \ (\mathrm{m^2/s}) \quad (2\text{-}2\text{-}7)$$

재령계수 : $m = 0.20$

임계 염소이온 농도 : $C_t = 0.05\%$(콘크리트 질량비)

위의 식은 침지실험에 의한 총 염소이온량을 측정하여 염소이온 프로파일을 오차함수를 사용한 해석해의 형태로 염소이온 확산계수 즉 겉보기 확산계수를 나타내고 있으며, 이들은 물-시멘트비의 함수로 표현하고 있다.

d. 실리카퓸 15% 이하 치환의 경우 확산계수는 $D_{SF} = D_{PC}{}^{e^{-0.165SF}}$ 을 사용하며, 실리카퓸은 C_t와 m에는 영향을 미치지 않는다.

e. 플라이애시나 슬래그를 사용한 경우, m은 다음과 같이 구하며 플라이애시와 고로슬래그의 최대 치환율은 각각 50%와 70%이다.

$$m = 0.2 + 0.4(\%FA/50 + \%SG/70) \tag{2-2-8}$$

f. 방청제를 사용한 경우에는 첨가율에 따라 부식 임계 염소이온 농도 C_t를 달리한다.

g. 멤브레인이나 실러를 사용한 경우에도 표면 염소이온 농도 C_s를 재령에 따라 증가하는 값을 적용한다.

h. 에폭시 도막 철근의 경우, 허용 열화한계에 도달하는 기간을 조정하여 염해 억제 효과를 산정하고 있으며, 스테인리스 스틸의 경우는 $C_t = 0.50\%$로 상향 조정하여 산정하고 있다.

- 허용 열화한계에 도달하는 기간 예측

허용 열화한계에 도달하는 기간 t_p를 6년으로 고정하여 보수 시기 $t_r = t_i + 6$ 년으로 산정하고 있다. 에폭시 도막 철근을 사용한 경우는 t_p를 20년으로 산정하고 있으며 사용자에 의하여 조정할 수 있다.

- 실험결과 및 분석

그림 3-2-1-141은 기존배합 및 최적배합의 고유동 수중불분리성 콘크리트의 재령 28일 염소이온 침투저항성을 나타낸 것이다. 실험에 의하면 기존배합 고유동 수중불분리성 콘크리트의 기중제작 및 수중제작 콘크리트의 염소이온 확산계수는 각

각 24.25 및 28.94×10-12 ㎡/s로 나타났다. 최적배합 고유동 수중불분리성 콘크리트의 기중제작 및 수중제작 콘크리트의 염소이온 확산계수는 각각 2.74 및 3.46×10-12 ㎡/s이며 수중제작 콘크리트의 염소이온 침투저항성이 약간 저하되는 것으로 나타났다. 기존배합과 최적배합과 확산계수를 비교해보면 약 8배 이상 최적배합의 확산계수가 작은 것을 볼 수 있는데, 이 연구결과는 기존 연구결과에서 물-결합재비 및 재령에 관계없이 고로슬래그 미분말을 혼입한 콘크리트의 염소이온 확산계수가 일반 콘크리트보다 작은 것으로 나타난 것과 유사한 경향을 지닌다. 고로슬래그 미분말 혼입률이 증가할수록 염소이온 확산계수는 감소하며 전 재령에 걸쳐서 염소이온 침투 저항성이 개선된다고 보고되어 있다. 또한 기존 연구결과를 보면 고로슬래그 미분말을 40% 치환한 물-결합재비 35%의 콘크리트의 경우 재령 28일 확산계수가 4.43×10-12 ㎡/s으로 보고되어 있으나, 최적배합의 경우 기중 및 수중제작 콘크리트 모두 확산계수의 값이 더 낮은 결과를 나타내고 있다. 이는 고유동 수중불분리성 콘크리트에 사용된 고성능 감수제의 성능 개선 및 최적배합비에 따른 혼화제의 적정 사용량의 결과인 것으로 판단된다.

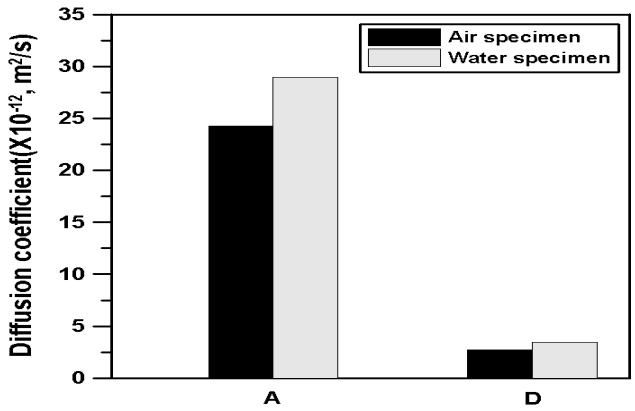
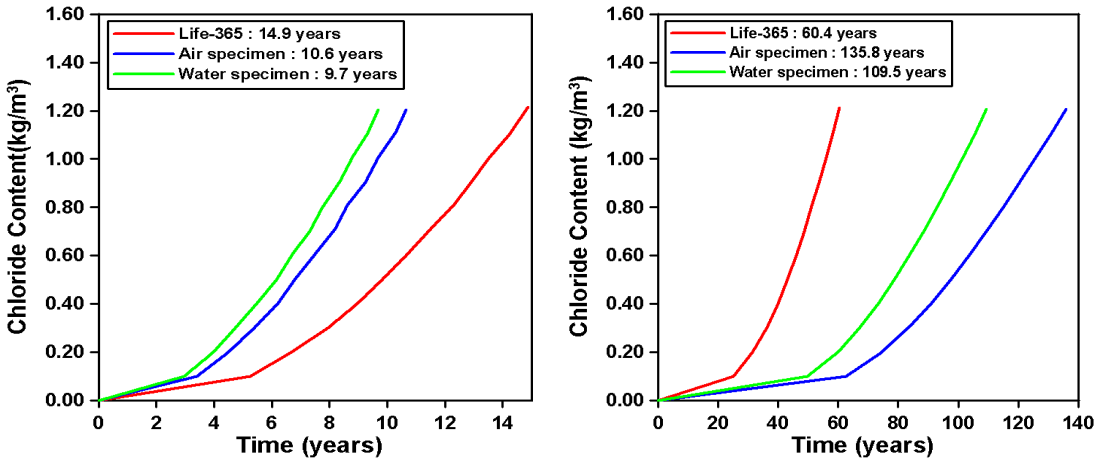


그림 3-2-1-141. 기존(A) 및 최적(D) 배합 콘크리트의 염소이온 확산계수

표 3-2-1-31. 내구수명 평가를 위한 입력변수

종류		확산계수 (㎡/s)	W/B (%)	m (재령계수)	표면염소 이온농도 (kg/㎥)	임계염소 이온농도 (kg/㎥)	피복두께 (mm)
A (기존)	기중	24.25×10^{-12}	50	0.20	20	1.2	80
	수중	28.94×10^{-12}					
D (최적)	기중	2.74×10^{-12}	37	0.43	20	1.2	80
	수중	3.46×10^{-12}					

표 3-2-1-31은 콘크리트의 내구수명에 미치는 염소이온 확산계수의 영향을 분석하기 위한 입력변수를 나타낸 것이다. 피복두께 80mm, 표면 염소이온 농도 20kg/㎥, 임계 염소이온 농도 1.2kg/㎥로 하여 각 실험별로 구해진 재령 28일의 확산계수를 입력하여 콘크리트의 내구수명에 미치는 염소이온 확산계수의 영향을 평가하기 위하여, ACI Committee 365에서 운영하고 있는 프로그램인 Life-365 program을 이용하여 결정론적 내구수명을 평가하였다. 그림 3-2-1-142는 시간에 따른 염소이온 농도의 변화를 나타낸 것으로, 각 실험별로 임계 염소이온 농도에 도달하는 시간을 예측한 결과이다. 기존 OPC 배합의 경우 기중 공시체는 10.6년, 수중 공시체는 9.7년으로 기중공시체의 내구수명이 더 큰 것으로 나타났으며, Life-365에서 제시한 염소이온 확산계수로 구한 내구수명인 14.9년보다도 작은 것으로 나타났다. 최적배합의 경우 Life-365가 제시한 내구수명은 60.4년으로 기중 공시체는 135.8년, 수중공시체는 109.5년으로 최적배합의 내구수명이 Life-365에서 제시한 값으로 구한 내구수명 보다 더 큰 것으로 나타났다. 이는 Life-365에서 제시하는 기본 확산계수 값이 최적배합보다 더 크기 때문인 것으로 판단된다. 또한 기존 OPC 배합보다 고로슬래그 미분말을 혼입한 최적배합의 콘크리트가 내구수명이 우수한 것으로 나타나 광물질 혼화재인 고로슬래그 미분말의 영향으로 최적배합 콘크리트의 염소이온 침투저항성이 개선된 것으로 판단된다.



(a) 기존배합 (b) 최적배합

그림 3-2-1-142. 기존 및 최적배합의 내구수명 평가

(9) 고유동 수중불분리 콘크리트의 유동특성 평가

- 실험개요 및 방법

설계기준강도 35MPa, 목표 슬럼프플로가 600mm 이상을 확보하는 고유동 수중불분리 콘크리트를 제조하기 위하여 유동성을 증가시키면서도 현탁물질 발생량을 저하시키기 위해 개발된 특수 수중불분리 혼화제를 사용하고, 물-결합재비 37%, 단위결합재량 550kg/㎥에 대해서 시멘트량의 40%를 고로슬래그 미분말로 치환한 적정배합을 개발하였다. 개발과정에서 수중불분리 콘크리트의 유동성 평가를 위해 사용되는 콘크리트용 수중 불분리성 혼화제 품질규격(KCI-AD102)에 따라 5분간의 수중불분리 콘크리트의 퍼진 길이를 측정하는 기중 슬럼프플로 방법이 사용되었다. 여기서 고유동 수중불분리 콘크리트의 유동특성을 파악하기 위해 기중 슬럼프플로 500mm 도달시간 및 수중 슬럼프플로를 측정하여 기중슬럼프플로와의 상관관계를 파악하고자 하였다.

- 실험결과

그림 3-2-1-143은 기중 슬럼프플로 측정값과 기중 슬럼프플로 500mm 도달시간과의 관계를 나타낸 것이다. 수중불분리 콘크리트의 슬럼프플로 500mm에 도달하는 시간이 60초 이하인 경우 이 수중불분리 콘크리트의 기중 슬럼프플로는 600mm 이상을 나타내는 것을 알 수 있다. 이것은 고유동 수중불분리 콘크리트의 목표 슬

럼프플로 600mm 이상 도달여부를 5분간의 기중 슬럼프 실험을 실시하지 않고도 조기에 판단할 수 있는 방법으로 사용될 수 있다.

그림 3-2-1-144는 기중 슬럼프플로와 수중 슬럼프플로와의 관계를 나타낸 것으로 기중 슬럼프플로 5분의 값과 수중 슬럼프플로 3분의 값이 유사하게 나타났으며 이에 3분 또는 5분간의 측정값을 수중 슬럼프플로 값으로 정하여 사용하는 방법을 제안하고자 한다.

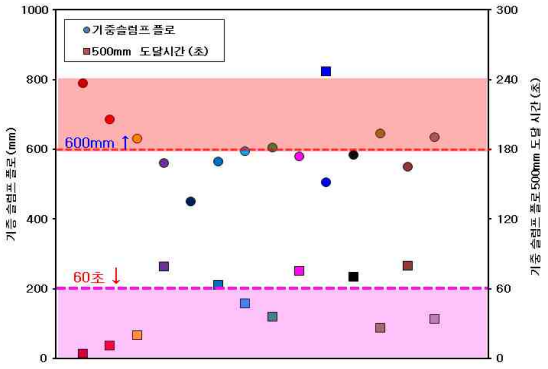


그림 3-2-1-143. 기중 슬럼프플로와 500mm 도달시간과의 관계

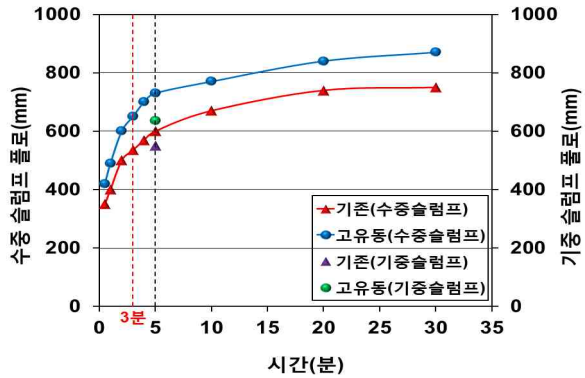


그림3-2-1-144. 기중 VS. 수중 슬럼프플로와의 관계

- 고유동 수중불분리 콘크리트 Test-bed

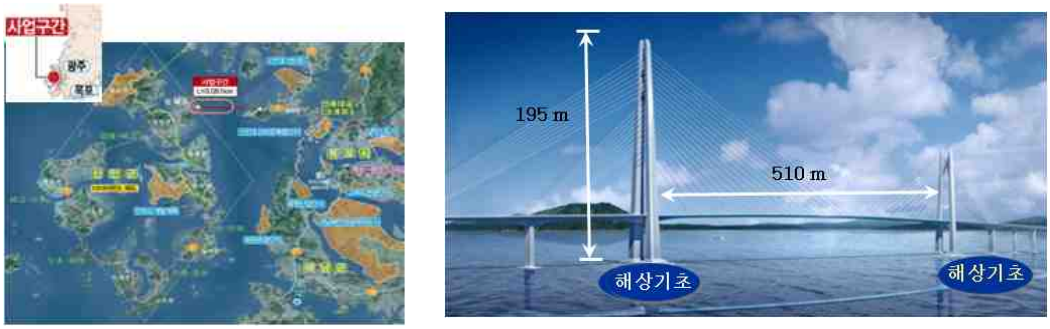
이 연구에서 개발한 수중불분리 혼화제 시제품과 최적배합을 기반으로 하여 고유동 수중불분리 콘크리트를 그림 3-2-1-145 및 그림 3-2-1-146과 같이 실제 공사구간에 Test-bed로 적용하였다. 적용현장은 (주)대우건설에서 추진하고 있는 압해-암태 1공구 새천년 대교 공사(사장교) 구간 RCD파일 구간이다. 다음은 Test-bed를 진행하기 위해 실시한 과정을 요약하여 나타내었다.

· 추진일정

대상교량 현황

- 사업명 : 암해-암태 1공구 RCD 해상 기초 공사

- 형 식 : 대구경 RCD 현장타설 파일 기초
- 규 모 : 주탑 및 접속교 기초 포함 총 221개
  (Pier 1~Pier 47(47×4개) + Pylon 1(18개) + Pylon 2(15개))
- 제 원 : 최대 구경 2,500mm RCD 파일



(a) 대상구간 (b) 조감도

그림 3-2-1-145. Test-bed 대상교량 현황

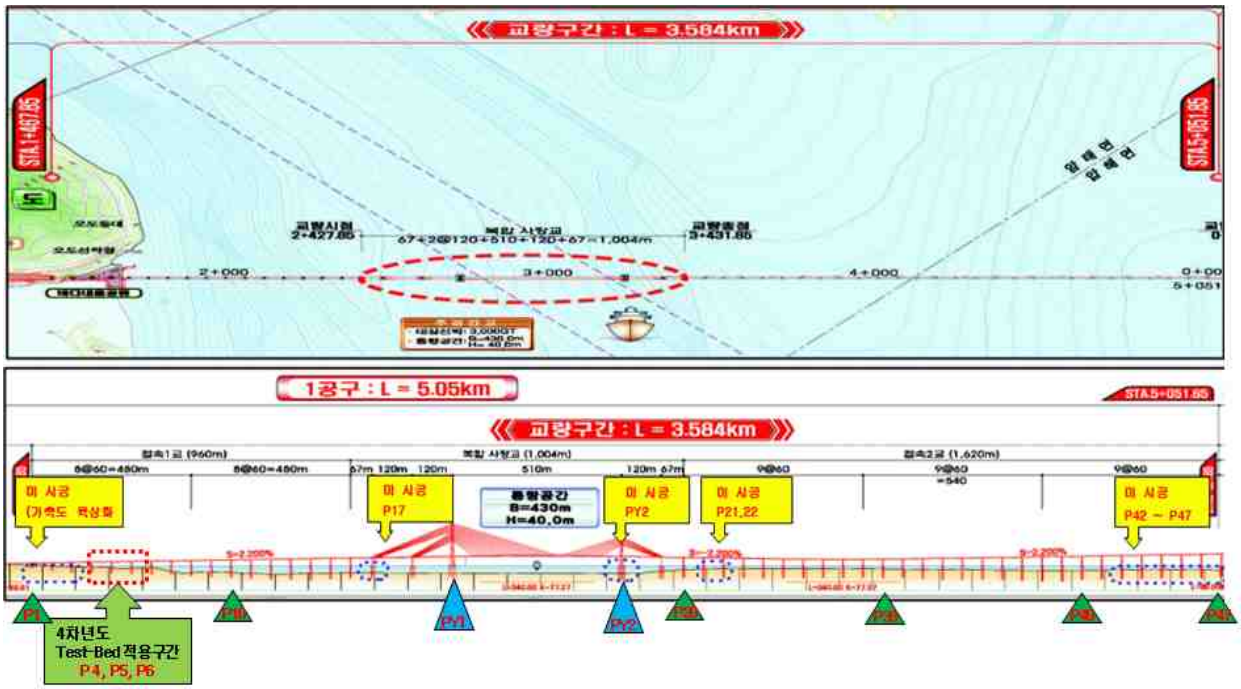


그림 3-2-1-146. RCD 시공현황

일정

- 현장시험배합 및 성능검증 : 2011. 4. 28 ~ 5. 4

- 해상 배처플랜트 현장 시험적용 배합 : 2011. 9. 28 ~ 10. 15
- 현장 Test bed 적용(4차년도) : 2011. 10. 18 ~ 2011. 12. 31
  : Pier 4 ~ Pier 6, 12개소 적용
- 현장 Test bed 전구간 확대 적용(5차년도) : 2012. 01. 01 ~ 2013. 05. 30
  : 주탑 및 접속교 기초 포함 총 209 개소

설계변경사항

ⓐ 슬럼프플로 500mm의 수중불분리 콘크리트를 600mm 슬럼프플로로 설계변경

- 연구개발 고유동 수중불분리 콘크리트 배합의 현장 적용성 평가
- 현장 사용 고로슬래그 시멘트를 대상으로 변경 배합 결정
- 압축강도 (28일 기준 50MPa), 유동성 (슬럼프플로 610mm) 확인
- 압축강도비 0.9이상 확보



그림 3-2-1-147. Test-bed를 위한 현장실험 현황

ⓑ 경제성 분석

압축강도 35MPa 기준수중불분리 콘크리트 재료비의 13% 절감효과를 확인할 수 있었고 자세한 내용을 표 3-2-1-32에 나타내었다.

표 3-2-1-32. 고유동 수중불분리 콘크리트 경제성 분석

항 목				기존 수중불분리 콘크리트	개발 수중불분리 콘크리트	
					실험실	현장 해상 (B/P(T/B))
배합표	목표강도 (MPa)			35	35	35
	목표 슬럼프플로 (mm)			500 정도	600 이상	600 이상
	W/B (%)			42	37	37
	단위량 (kg/㎥)	W		210	204	204
		C		500	330	-
		고로슬래그 시멘트		-	-	550
		BFS		-	220	-
		S		636	696	696
		G		859	833	833
		수중 불분리제	기존품	2.5	-	-
			개발품	-	2.1	2
	고성능감수제 (B×%)		기존 (B type)	2.5	-	-
			기존 (C type)	-	2.5	2.5
제조 단가 (원/㎥)				134,961	120,217	118,916
단가 저감액 (원/㎥)				-	14,744	16,045
단가 저감율 (%/㎥)				-	12.3	**13.5**

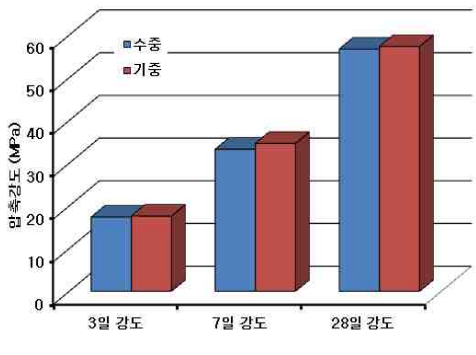


그림 3-2-1-148.. Test-bed를 위한 현장배합 압축강도 결과

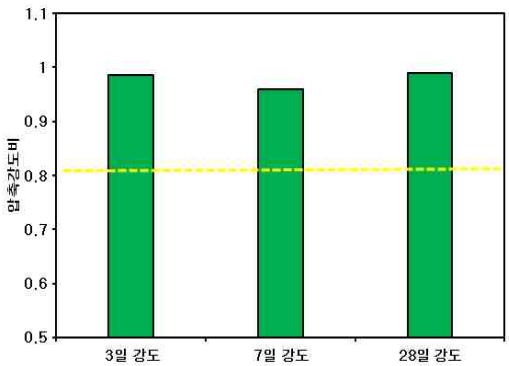


그림 3-2-1-149. Test-bed를 위한 현장배합 수중/기중 압축강도 비

- 현장지원 및 Test-bed 적용

실내 실험 및 해상 B/P(Batcher Plant)에서의 실험을 바탕으로 Test-bed에 고유동 수중불분리 콘크리트를 적용하였다. 현장타설에 앞서 골재 사정에 따라 해상 배처 플랜트 제조용 수중불분리 콘크리트 배합 수정을 하였고 트레미관 막힘 현상 유무 모니터링을 통해 고유동 수중불분리 콘크리트의 품질 향상에 주력하였다. 다음은 이 연구에서 개발된 고유동 수중불분리 콘크리트 현장 적용 과정을 나타낸 것이다.



그림 3-2-1-150. 현장 Test-bed 현황

- 수중콘크리트 배합 개선

· 추가 연구 추진배경

이 연구에서는 압축강도 35MPa, 슬럼프플로 600mm 이상이고, 동시에 현탁물질 150mg/ℓ 이하를 목표로 하는 고유동 수중불분리 콘크리트를 개발하여 적용하는 것에 초점을 두어 진행하였다. 그러나 이 연구에서 대상으로 하는 RCD 공법으로 건설되는 현장타설말뚝에 적용하는 기초 콘크리트는 그림 3-2-1-151에서 보는 바와 같이 수중불분리성 콘크리트 보다는 수중콘크리트의 사용량이 많다.

일반적인 수중콘크리트는 물과 맞닿아 시멘트 페이스트가 씻겨나가는 것을 고려하여 부배합으로 구성하여 공기 중에서 시공할 때보다 높은 배합강도를 가지는 콘

크리트로 치거나 설계기준강도를 작게 한다. 그러나 해상에서 건설되는 RCD 공법의 경우 대구경 희생강관을 사용하고 슬라임 제거 및 차수 역할을 하는 수중불분리성 콘크리트 다음에 트레미를 이용하여 수중콘크리트를 타설하기 때문에 지나친 부배합은 경제성을 떨어뜨리는 요인이 될 수 있다. 특히 RCD 공법에서 기초 콘크리트로 사용되는 수중콘크리트는 다짐이 불가능하기 때문에 슬럼프 개념의 배합(슬럼프 12-18cm 확보) 보다는 슬럼프플로(600mm) 개념의 고유동성을 확보하는 배합을 사용하는 것이 필요할 수 있다.

따라서 추가적인 연구로써 해상기초용 수중콘크리트의 유동성을 높이는 연구를 수행하였으며, 목표 슬럼프플로는 600mm로 설정하였다. 이 연구를 통하여 해상기초, 특히 초장대 교량에 가장 적합한 현장타설말뚝 공법에 사용되는 수중 및 수중불분리 콘크리트의 효율을 극대화 할 수 있었다.

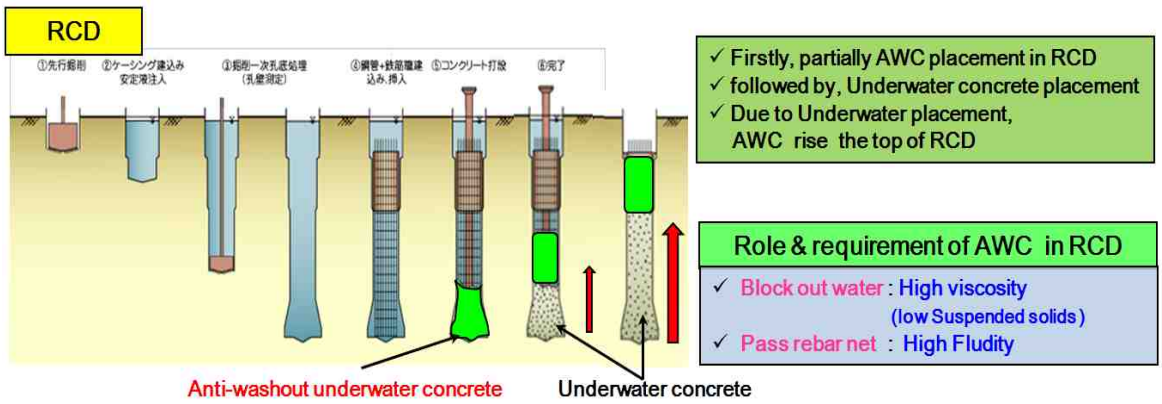


그림 3-2-1-151. RCD 공법에서의 수중콘크리트

· 연구수행 내용

이 연구에서는 RCD에서 사용량이 많은 수중콘크리트의 배합을 개선하기 위하여 원안의 수중콘크리트 배합을 바탕으로 표 3-2-1-33과 같이 개선된 배합을 제시하였다. 개선된 배합은 슬럼프플로 600mm를 확보하도록 하여 고유동 특성을 나타내도록 하였다. 여기서 사용한 고성능 감수제는 점성성분이 부여된 특수증점제를 개발하여 사용하였다. 개발한 수중콘크리트의 강도는 7일에 28~30 MPa , 28일에 40~42 MPa을 나타내어 설계기준강도 35MPa를 만족하였다.

표 3-2-1-33.. 수중콘크리트 개선 배합설계

구분	W/B (%)	S/a (%)	단위중량(kg/㎥)					혼화제 (B×%)	AE제 (B×%)	비고 (슬럼프 플로(mm))
			단위 수량	시멘트	세척사	부순 모래	굵은 골재			
원안	37.9	48.0	165	435	369	453	902	0.8	0.015	18cm (슬럼프)
현재 적용중	38.3	44.0	163	426	379	380	979	0.9	0.025	500
배합 개선	**34.6**	**42.5**	**143**	**413**	**396**	**377**	**1033**	**1.3**	**0.032**	**600**

④ 기대효과

이미 이 연구의 최초 연구목표인 고유동 수중불분리 콘크리트를 개발하고 이어 추가로 고유동 수중콘크리트를 개발함으로써 해상기초 콘크리트 공사의 효율을 극대화 할 수 있는 마련하였다. 이 개선된 수중콘크리트 배합은 감리단과 협의를 거쳐 배합의 변경을 통하여 2013. 5월 암태구간 접속교(Pier45,46,47)에 시험 적용되었다.

이를 토대로 압해-암태 1공구(새천년대교) RCD 해상기초 품질향상 및 시공 효율성 증대시키는 효과뿐만 아니라 이 연구에서 얻어진 결과물인 고유동 수중불분리 콘크리트 및 고유동 수중콘크리트를 현장에 일괄 적용하는 성과를 거두었다.

- 콘크리트 건전도 모니터링(Monitoring)

· 초음파를 이용한 건전도 시험

ⓐ 시험목적

말뚝 건전도 시험(Cross-Hole Sonic Logging Test)은 초음파를 이용한 방법으로써 콘크리트 타설 전 말뚝에 2개의 Tube를 등 간격으로 설치하여 콘크리트 타설 후 한쪽의 Tube에서 보낸 초음파를 다른 Tube에서 받아 도달시간 및 신호의 크기를 측정하여 말뚝의 건전도, 공극, 결함의 여부 및 위치를 조사하는 시험이다.



(a) 발신기 및 수신기 삽입전경



(b) 모니터

그림 3-2-1-152. 현장 Test-bed 건전도 모니터링

이 연구에서는 고유동 수중불분리성 혼화제 및 이를 이용한 고유동 수중불분리 콘크리트를 개발하여 Test-Bed의 일환으로 「압해-암태(1공구) 사장교 건설 공사」의 RCD 해상 기초 공사에 적용하였다. 타설된 수중불분리성 콘크리트를 포함한 수중콘크리트의 건전도를 모니터링을 하기 위해 접속1교 Pier 13-2의 현장타설 말뚝(∅2,200mm)을 대표적으로 선택하여 아래와 같이 말뚝 건전도 시험을 실시하였다.

ⓑ 시험현황

표 3-2-1-34. 시험현황

시험위치	말뚝번호	시공공법	검측공수
접속1교 Pier 13	2	R.C.D	7

ⓒ 시험장비

시험에 이용된 장비의 제원은 표 3-2-1-35.와 같다.

표 3-2-1-35. 장비의 제원 및 구성

구분	내 용
제원	- 장비명 : Cross Hole Sonic Analyzer (CHA) - 제작회사 : 미국 Pile Dynamics Inc. - 특 징 : · signal generating and conditioning electronics · A pair of probes (transmitter and receiver) · 외경 25㎜ 길이 200㎜ · 2개의 pulley와 2개의 깊이 측정기에 의하여 정확한 거리 측정
구성	1) 초음파 발,수신센서와 케이블 2) 케이블의 인입 및 인발을 이용한 측정심도 자동측정기 3) 초음파 신호발생기 4) 초음파 발,수신 콘트롤 장치 5) 모니터링 장치 또는 프린터 6) 검사용 Tube내의 센서를 중앙에 위치할 수 있는 장치
	

말뚝 건전도 시험에 사용되는 장비는 최소한 12 bit A/D Converter 와 500 kHz의 Sampling 주파수를 컴퓨터에 내장된 기기로 시험 중 신호를 보여 줄 수 있고 모든 신호를 저장할 수 있는 것으로 하였다. 이는 높은 A/D 해상도와 높은 수의 Sampling를 가진 Low noise의 신호변환은 양질의 자료수집에서 중요하고 좋은 해석을 만들 수 있다.

- 건전도 평가기준 및 등급

ⓐ 초음파의 전달속도

이론적으로 콘크리트의 탄성계수가 클수록 초음파의 전달속도가 빠르고 따라서 도달 시간이 짧다. 콘크리트의 탄성계수(E)와 초음파의 전달속도(C), 콘크리트의 밀도(ρ), 콘크리트의 압축강도(σck)는 다음과 같은 관계식을 가진다.

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{2-2-9}$$

$$E = 15{,}000\sqrt{\sigma_{ck}} \tag{2-2-10}$$

식 2-2-9 과 식 2-2-10 를 이용하면 탄성파 속도를 이용하여 콘크리트 강도를 추정할 수 있으며 그 결과는 표 2-2-16 과 같다. CSL시험의 경우 경계조건이 봉과 같이 횡방향 변위가 허용되는 조건이 아닌 횡방향 구속의 조건이 된다. 이 경우 얻어지는 탄성계수는 구속 탄성계수, M(constrained Modules)으로 식 2-2-11의 영 탄성계수와는 약간 다르게 된다. 구속탄성계수와 영 탄성계수와의 관계는 다음과 같다.

$$M = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \tag{2-2-11}$$

콘크리트의 포와송비는 0.15~0.20이며 평균값으로 0.17을 취하면 구속탄성계수 값이 영 탄성계수에 비해 약 7.5% 정도 더 크게 나오므로 콘크리트가 매질인 경우에는 두 계수의 차이가 그리 크지 않게 된다. 또한 콘크리트의 밀도는 약 23.0kN/㎥ 정도이므로 이들을 이용하여 콘크리트 매질의 압축강도와 구속탄성계수, 영계수

및 초음파 전달 속도를 살펴보면 다음과 같다.

표 3-2-1-36. 압축강도에 따른 초음파 속도

압축강도	21MPa	24MPa	28MPa	35MPa
영계수 E (MPa)	2.2×10^4	2.3×10^4	2.5×10^4	2.8×10^4
구속탄성계수 M(MPa)	2.37×10^4	2.47×10^4	2.69×10^4	3.01×10^4
초음파 속도 C(m/s)	3,174	3,244	3,385	3,581

콘크리트에서의 초음파 전달속도는 대략 3,000~4,500 m/sec 사이의 값을 가지며 콘크리트의 질에 문제가 있거나 결함이 존재할 경우 초음파 전달속도가 떨어진다. 다음 표 3-2-1-37은 여러 가지 매질의 밀도와 전파속도 그리고 음향학적 임피던스를 표시하였다.

표 3-2-1-37. 압축강도에 따른 초음파 속도

매질	밀도 (kN/㎥)	전파속도 (P파 속도, m/s)	음향학적 임피던스 (kN/㎡-s)	35MPa
Air	1.205×10^{-3}	343	0.00413	2.8×104
Concrete	23.0	3,000~4,500	$6.9\sim10.4\times10^4$	3.01×104
Granite	27.5	5,500~6,100	$15.1\sim16.8\times10^4$	
Limestone	26.9	2,800~7,000	$7.5\sim18.8\times10^4$	
Marble	26.5	3,700~6,900	$9.8\sim18.3\times10^4$	
Quartzite	26.2	5,600~6,100	$14.7\sim16.0\times10^4$	
Soils	14.0~21.5	200~2,000	$0.28\sim4.3\times10^4$	
Steel	78.5	5,940	46.6×10^4	
Water	10.0	1,480	1.48×10^4	

콘크리트에서의 초음파 전달속도는 현장 상황 및 여건에 따라 그 값이 많은 영향을 받으므로 어느 값으로 한정시킬 수는 없으나 건전한 콘크리트 내부에 물리적인 성질이 상이한 재료가 포함될 경우(토사 혼입, 재료분리, 공동형성 등) 음파의 기본 성질상 경계면에서 반사 및 굴절이 발생하고 이는 파의 전달경로를 길게 하는 효과를 가져오므로 결과적으로 초음파 전달속도의 저하가 초래된다.

ⓑ 기존 연구결과에 의한 말뚝의 평가 등급

콘크리트의 초음파 전달속도는 현장상황 및 여건에 따라 에너지 및 전파속도에 많은 영향을 미치므로 종합하여 제시된 값은 없으나 그동안 연구자들에 의해 제시된 초음파 속도를 나타내면 다음과 같다.

표 3-2-1-38. 콘크리트의 품질별 압축파 속도(m/s)

조 건	기준 1 (after Ellway)	기준 2 (after Hearne, Stokoe, etc)
아주 양호	4,120 이상	4,570 이상
양 호	3,300 ~ 4,120	3,660 ~ 4,570
의 심	2,750 ~ 3,300	3,050 ~ 3,660
불 량	1,920 ~ 2,750	2,130 ~ 3,050
극히 불량	1,920 이하	2,130 이하

상기의 표 3-2-1-38에서와 같이 콘크리트의 품질에 따른 특정 범위의 초음파 전달속도를 제시한 연구자들도 있으나 현장 조건을 고려하지 않은 일반론적인 제안은 한계가 있다. 대부분의 경우 콘크리트의 압축파 속도를 3,500~4,000 m/sec로 가정하는 것이 보편적이다.

한편, 한국도로공사의 “현장타설 콘크리트 말뚝 공대공 초음파 검사 시방(안)”에

따르면 말뚝에 대한 건전도 및 결함 발생 여부는 초음파 검사로부터 얻어지는 초음파 신호의 전파시간, 신호에너지의 강도, 주시곡선의 형태를 말뚝 심도에 따라 연속적으로 profile 그래프를 분석하여 내부 결함 판정 기준을 다음과 같이 제시하였다.

표 3-2-1-39. 현장타설 콘크리트 말뚝의 내부결함 판정기준

등 급	판 정 기 준	점 수	비 고
A (양 호)	- 초음파 주시곡선의 신호왜곡이 거의 없음. - 건전한 콘크리트 초음파 전파속도의 10% 이내 감소에 해당하는 전파시간 검측	0	V = S/T V:전파속도 T:전파시간 S:튜브간의 거리
B (결함의심)	- 초음파 주시곡선의 신호왜곡이 다소 발견 - 건전한 콘크리트 초음파 전파속도의 감소폭이 10~20% 이내에 해당하는 전파시간 검측	30	
C (불 량)	- 초음파 주시곡선의 신호왜곡 정도가 심함 - 건전한 콘크리트 초음파 전파속도의 감소폭이 20% 이상에 해당하는 전파시간 검측	50	
D (중대결함)	- 초음파 신호 자체가 감지되지 않음. - 전파시간이 초음파 전파속도 1,500 m/s에 근접	100	

한편, 측정된 결과는 표 3-2-1-39에 나타난 기준에 대하여 건전한 콘크리트의 초음파 전달속도의 20% 감소에 해당하는 결함점수는 30점이며, 특정 심도에서의 말뚝의 종합적인 건전도는 검측 경로별 점수를 합산하여 검측 경로의 수로 나눠 이들의 평균값을 구하고 이들의 점수가 30점 이상인 경우 초음파 검사 전문가와 지반공학 및 구조공학 전문가의 자문을 받아 보강여부를 결정하도록 하고 있다. 말뚝심도 평균점수는 아래와 같이 구할 수 있다.

말뚝심도(단면)평균점수 = 1/n∑(해당 심도에서의 검측경로별 프로파일 그래프의 점수)

여기서, n = 검측 경로의 수

따라서, 도로공사 시방안에 의할 경우 초음파 속도가 건전한 콘크리트에 비해 20% 이내로 감소할 경우 양호 또는 결함의심으로 생각되나 최종적으로는 보강이 불필요한 양호한 단면으로 판정하게 된다.

ⓒ 이 현장의 콘크리트 말뚝에 대한 건전도 평가기준 및 등급

a. 초음파 전달속도에 의한 평가

이 현장의 CSL 시험은 콘크리트 설계강도를 기준하여 초음파 속도를 3,581m/sec(설계기준강도 fck=35 MPa)로 가정하고 분석 하였다.

표 3-2-1-40. 음파 검층을 통한 콘크리트 평가 등급

평가등급	시 험 결 과	점수
A	초음파 수신 에너지의 감소가 거의 없고 초음파 전달 속도의 감소가 건전한 콘크리트의 10%이내 - Good	0
B	약간의 초음파 전달에너지의 감소가 있고 건전한 콘크리트 전달속도의 20% 감소 - Acceptable	30
C	초음파 전달에너지의 감소가 현저하고 건전한 콘크리트의 초음파 전달속도의 20% 이상의 전달속도 감소 - Questionable	50
D	초음파 전달속도가 물에서의 속도(1,500 ~ 2,000m/sec) → 물로 채워진 공동 또는 Gravel Intrusion등의 심각한 결함	100
No Signal	검측공 - 콘크리트 접합부 이격(Debonding)으로 시험 불가	

b. 시험 결과

이 현장의 시험말뚝 조건은 현장타설말뚝을 시공 후 미리 매설된 검측공 (그림 3-2-1-153)을 이용하여 CSL(Cross-hole Sonic Logging) 방법으로 말뚝의 건전도

시험을 실시하였다. 7개의 검측공을 이용하여 21개의 단면에 대한 시험을 실시하였으며 단면의 번호 매김은 1번으로 기준하여 시계방향으로 번호를 부여하였다.
시험의 해석결과를 나타내는 방법에는 신호의 크기와 도달시간, 신호의 크기와 전달속도로 표시하는 것이 대표적인데 결함판정을 위해서는 신호의 에너지 감쇠와 전달속도 저하를 동시에 관찰하여야 하므로 신호의 크기와 파의 전달속도를 도시하여 결과를 판정하였다.

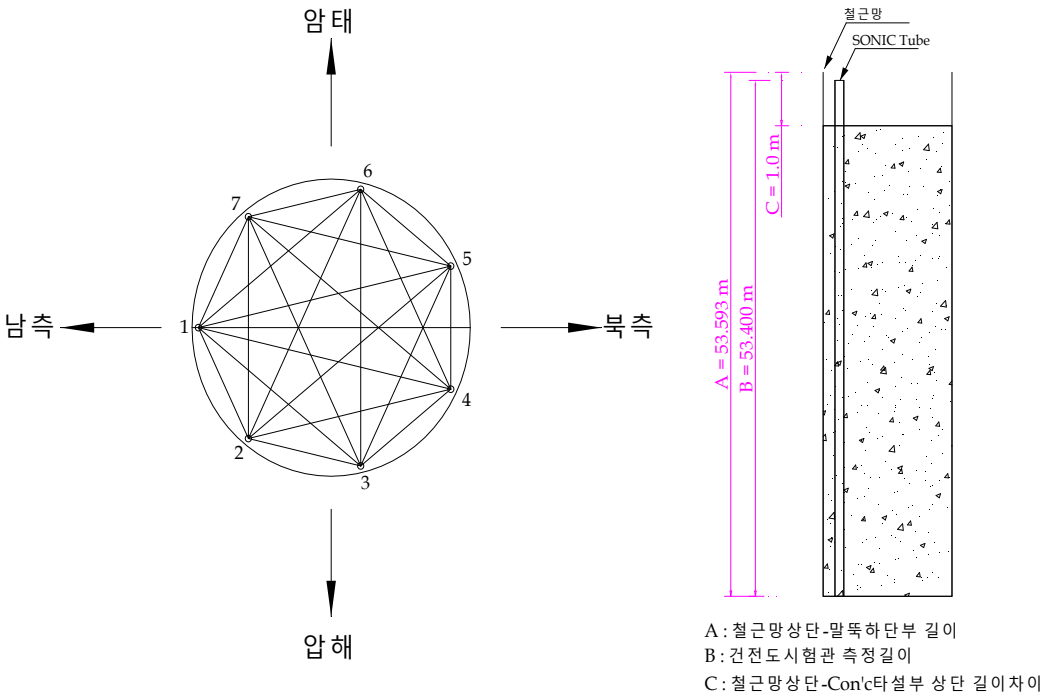


그림 3-2-1-153. 검측공 경로횟수 및 측정개요

Pier13-2에 대한 건전도 실험을 실시한 결과, 압축파의 도달속도(Wave speed)는 3,585~6,066m/sec 전후로 나타났으며 검측단면별 측정결과 A는 다음과 표 2-2-20와 같다. 평가결과 초음파 수신 에너지의 감소가 거의 없고 초음파 전달 속도의 감소가 건전한 콘크리트의 10% 이내에 있는 것으로 나타났다. 이것은 단면의 전체적인 평균값으로 보아 Pier13-2 말뚝의 평균점수는 “0”점으로 A등급을 나타내었고 도달시간 지연(%) 및 에너지 감소(dB)를 고려하더라도 전체적인 시공품질은 모두 양호한 것으로 나타났다. 이는 말뚝 내에 채워진 고유동 수중불분리성 콘크리

트를 포함한 수중콘크리트의 충전상태가 양호함을 알 수 있다.

표 3-2-1-41. 측정결과

tube 경로	전달속도 (m/sec)	잠재성 결함 위치(m)	전파속도 감소율(%)	도달시간 지연(%)	Energy 감소(dB)	점 수
1-2	3,667~5,239	-	-	6	4.8	0
1-3	4,347~5,869	-	-	7	7.6	0
1-4	4,770~5,641	-	-	7	9.2	0
1-5	4,105~6,066	-	-	6	6.0	0
1-6	3,619~5,165	-	-	6	7.7	0
2-3	3,590~4,447	-	-	4	5.6	0
2-4	4,347~5,850	-	-	8	6.2	0
2-5	3,733~5,094	-	-	6	6.3	0
2-6	3,843~5,435	-	-	5	6.0	0
2-7	3,600~4,205	-	-	2	6.1	0
3-4	3,872~4,927	-	-	6	6.9	0
3-5	4,061~5,256	-	-	6	6.4	0
3-6	4,273~5,850	-	-	4	7.7	0
3-7	3,803~4,888	-	-	7	8.7	0
4-5	3,585~5,775	-	-	4	2.1	0
4-6	3,967~5,671	-	-	4	4.7	0
4-7	3,742~4,741	-	-	9	8.2	0
5-6	3,722~5,470	-	-	6	5.0	0
5-7	3,970~5,673	-	-	4	5.0	0
6-7	3,721~5,206	-	-	6	5.0	0
7-1	3,628~4,297	-	-	6	4.1	0
합 계						0
점수(평균)						0
판 정						**A**

- 전극방법을 이용한 건전도 시험 제안

이 연구에서는 콘크리트 충진 상태를 검측하기 위한 방법으로 기존 초음파 탐상을 위한 방법 보다 진보된 기술방안을 도입하여 충전상태를 모니터링 할 수 있는 시스템 구축하고자 이 연구에서 새롭게 고안하여 시험법을 제안하고자 하였다. 현재 이 실험방법은 실험실 단계에서 진행 중에 있으며 압해-암태 1공구 현장일정에 따라 수중콘크리트 배합개선을 통한 현장적용(2013년 4월 예정)을 실시할 때 이 방법을 시험적용해 볼 예정이다. 따라서 여기에서는 실험방법에 대한 기본개념을 정리하는 것으로 하였다.

ⓐ 기존 초음파 건전도 시험의 문제점

기존의 말뚝 건전도 시험(Cross-Hole Sonic Logging Test)은 초음파를 이용한 방법으로써 콘크리트 타설 전 말뚝에 2개의 Tube를 등 간격으로 설치하여 콘크리트 타설 후 한쪽의 Tube에서 보낸 초음파를 다른 Tube에서 받아 도달시간 및 신호의 크기를 측정하여 말뚝의 건전도, 공극, 결함의 여부 및 위치를 조사하는 시험이다. 그러나 이 실험방법은 콘크리트 타설이 끝난 후 일정강도를 확보한 이후에 실시하게 되어 타설된 콘크리트의 결함이 발견되었을 경우 보수하는 방법이 상당히 복잡해 질 수 있다.

또한 초음파를 이용하는 방법은 상당한 오차를 인정하고 있기 때문에, 결함조사 결과 나타난 “응력파적 이상부위”가 나타나는 경우가 있더라도 반드시 말뚝의 구조적인 안정을 위협하는 이른바 “구조적 결함(structural defects)"으로 바로 판정하지 않는다. 예를 들어 구조적으로 그다지 문제가 되지 않는 경미한 균열이나 실제로 큰 문제를 일으키는 커다란 균열도 응력파 전파 특성 측면에서는 거의 비슷한 효과를 나타내는 경우도 발생하기 때문이다.

따라서, 시험성과로부터 판정되는 결과는 일차적으로 잠재성 결함으로 간주하는 것이 원칙이며, 안정성 측면에서 문제를 최종적으로 판정하는 데는 다른 보조시험 및 조사와 구조적인 해석 등을 통하여 정밀한 확인 절차가 필요할 수도 있음에 유념해야 한다. 이에 도로공사 시방 안에서 일정심도에서의 말뚝의 건전성은 한, 두 단면의 의심 또는 결함 판정이 곧바로 전체 말뚝에 대한 의심이나 결함이란 결론은 아니며 전체 단면들의 건전성 여부도 함께 평가되어야 한다고 지적하고 있다.

ⓑ 전극방법을 이용한 건전도 시험법 개발

콘크리트 타설 시 말뚝 내에 콘크리트의 충전여부를 모니터링을 통하여 판단할 수 있다면 타설 시 발생될 수 있는 콘크리트의 내부결함 등을 파악하여 조치를 취함과 동시에 콘크리트에 대한 품질을 관리하여 향후 구조물 축조 후의 안정성을 한층 더 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

따라서 이 연구에서는 기존 초음파 탐상을 위해 사용하던 스틸파이프를 전극으로 이용하여 말뚝 내 콘크리트 타설 시 내부 유체상태 콘크리트의 전해질 상태변화 및 공극여부에 따른 전압강하량 및 주파수의 변화에 따라 말뚝 내부의 충전상태를 측정하는 방법을 통해 그림 3-2-1-154와 같은 모니터링 방법을 개발하고자 하였다.

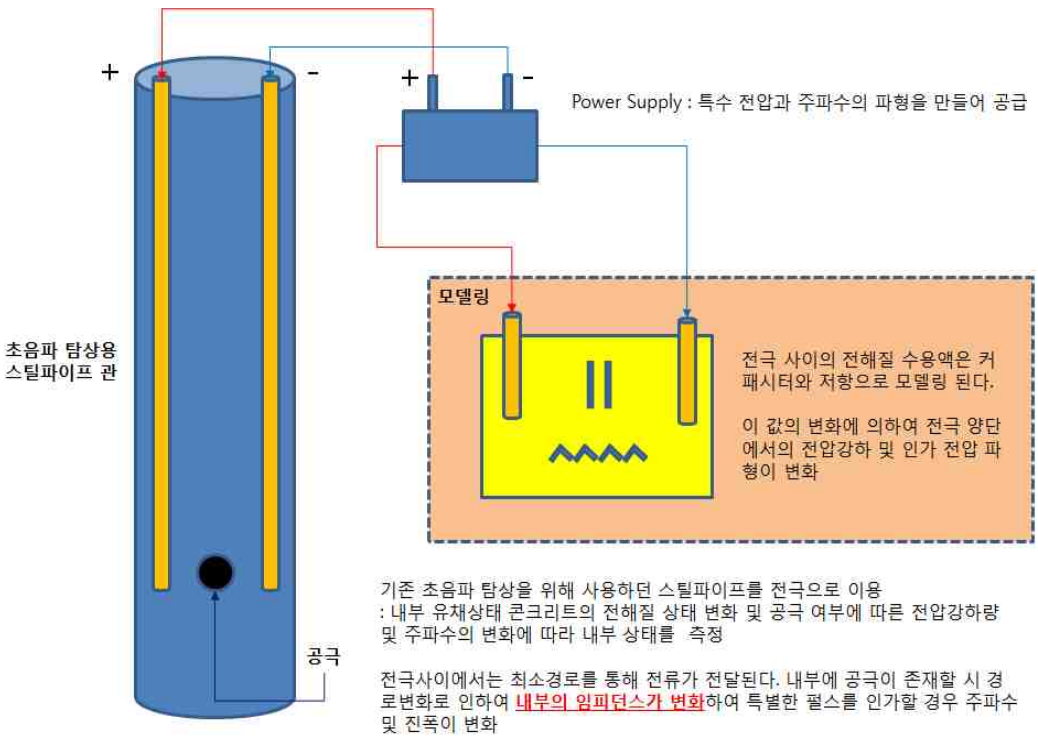


그림 3-2-1-154. 실험 개념도

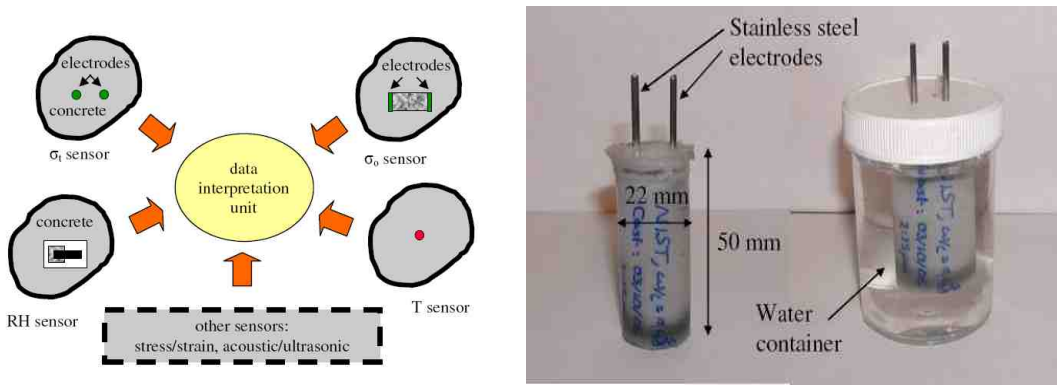
한편 이 연구에서는 다음과 같은 기본개념 가설을 도입하여 측정방법의 타당성을 부여하였다.

ⓒ Fresh Conc. 내부에는 전해질 용액 성분이 포함되어 있어 전도성을 띈다.

한편, 2007년 Farshad Rajabipour, Gaurav Sant, Jason Weiss 등에 의해 콘크리트의 전도성 측정을 통한 콘크리트 재료의 상태를 측정하는 기법과 분석 방법 등이 제안 되었다. 콘크리트의 전기 전도성은 그림 3-2-1-155와 같이 콘크리트 내부 2개 지점에서의 전기저항성을 측정함으로써 얻어 질 수 있는데 측정된 저항은 재료상태와 측정 지오메트리에 따라 정량화 될 수 있다. 이것을 식으로 표현하면

$$\sigma_t = \frac{k}{R_b} \tag{2-2-12}$$

여기서 σ_t (S/m)은 콘크리트 전도도, R_b (Ω)는 측정된 저항이고, k $(\frac{1}{m})$은 실험 및 계산을 통해 획득된 지오메트리 팩터 (geometry factor)이다.



(a) 콘크리트 전도성 응용 센서 (b) 콘크리트 전도성 측정 예

그림 3-2-1-155. 콘크리트 전도성 측정

ⓓ 전극을 삽입하여 전류를 인가할 경우 내부 전해질의 농도나 공극여부에 따라 전압강하량이 변화한다.

특히 굳지 않은 콘크리트는 이온화된 전해질 물질인 Na^+, K^+, Ca^{2+}, OH^-, SO^{2-}, Cl^- 을 포함하고 있으며, 이를 통해 전도성을 확인 할 수 있다. 액상의 콘크리트 전도성의 범위는 $\sigma_0 = 1 S/m$ 에서 $\sigma_0 = 20\ S/m$ 의 값을 가지고 있다.

ⓔ 파일내부에 삽입된 전극에서의 전류는 『최소 전달 경로의 법칙』을 따라 흐르게 되므로 전극의 높이에 따라 그 위치의 전압강하량은 일정하게 된다. 또한 경로별로 콘크리트 수용액의 내부 임피던스 변화를 측정하기 위하여, 입력 전류에 일정한 펄스 파형을 인가하게 되면 임피던스의 변화에 따라 출력 전류의 펄스 진폭 및 주파수가 변화하게 되고, 이를 모델링 할 경우 정량적인 내부 임피던스 상태를 그림 3-2-1-156.과 같이 추정할 수 있다.

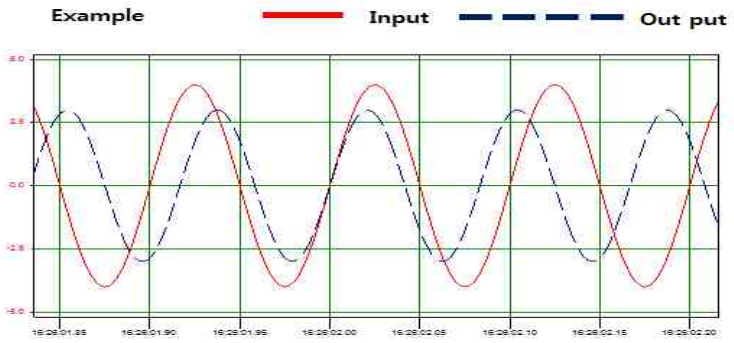


그림 3-2-1-156. 입출력 전류 파형 예상

따라서 이 연구에서는 현재 이 실험방법을 말뚝기초 콘크리트 타설 시 모니터링 방법으로 적용하고자 하며 개선된 수중콘크리트 배합 현장적용 시 진행할 예정이며 측정방법은 다음과 같다.

- 콘크리트의 전류 전압인가는 10V, 10A, 1kHz 펄스를 인가하여 입력 전류/전압 대비 출력 전류/전압 파형변화 계측함
- 물/해수 등 전해질 물질에 대한 내부 감쇄율을 설정하여 노이즈 등, 신호잡음을 제거함
- 공극 측정은 1개의 기본 전극과 2개의 대비 전극을 매립하여 공극 여부에 따른 전류/전압 강하량을 비교함

라. 고기능성 콘크리트 성능규격 시스템 구축

(1) 고압송 콘크리트의 성능규격 개발

본 연구는 고압송용 콘크리트와 관련된 국내·외 기준 및 시공사례 분석을 통하여 고주탑 시공에 적합한 고압송용 콘크리트의 성능규격을 개발하는 것이다. 이를 위해 본 연구에서는 먼저 국내·외 기존 연구자료 및 시공사례를 분석하였고, 이를 바탕으로 고압송 콘크리트의 성능규격을 구성하였다.

(가) 국내·외 기존 연구자료

국내·외적으로 펌프압송에 대한 규격은 표 3-2-1-23에 나타낸 바와 같다. 한국은 한국건축학회의 초고층 건축물 건설기술 지침에 펌프압송 콘크리트에 대한 규정을 포함하고 있으며, 주요 내용은 배관, 시멘트, 골재 그리고 공법에 대한 내용을 담고 있다. 그러나 일반적인 내용에 가깝고, 압송 높이에 따른 재료 및 공법 등의 상세 내용은 파악하기는 어려운 것으로 나타났다. 일본의 경우, 많은 실험을 바탕으로 제작되어 재료적인 부분에 있어서 가장 상세한 규정이 된 것으로 나타났으며, 미국의 경우는 주로 장비 및 시공방법에 대한 내용을 다루고 있다. 유럽의 경우 펌프장비의 안전한 사용방법 또는 고유동 부분에 대한 자료는 있으나, 콘크리트 펌프압송에 있어서 배관 또는 물성 값에 대한 내용은 부족한 것으로 나타났다. 중국은 펌프압송에 대한 규격은 미비한 것으로 나타났으나, 400m 이상 구조물에 대한 시공실적을 보유하고 있는 것으로 나타났다.

국내·외 규정 및 시공사례를 분석한 결과 공통적으로 압송용 콘크리트는 압송 전·후에 물성 및 점도에 대한 차이가 없어야 하며, 압송 시의 콘크리트의 재료, 배관 및 장비 그리고 압력 및 손실 등을 주요내용으로 하고 있다. 그러나 압송높이에 따라 펌프의 압력을 달리하여야 하며, 이에 따른 배관 및 시공방법에 차이가 있어야 하며, 이럴 경우 많은 변수가 발생하여, 세부적으로 규정하기는 어려운 것으로 나타났다. 따라서 일반 펌프압송과 달리 고압송에 대한 규정이 별도로 필요한 것으로 판단되며 이에 본 연구에서는 400m 이상의 고압송 규격을 개발하고자 한다.

표 3-2-1-42. 국내·외 펌프 압송 콘크리트의 시공지침 및 규격

구분	시공 지침 및 규격
한국	초고층 건축물 건설기술 지침 (한국건축학회 2007)
일본	콘크리트 펌프 공법 (일본건축학회) 콘크리트의 펌프 시공 지침 (일본토목학회 2001) 콘크리트의 압송공법 가이드라인 및 해설 (콘크리트공학협회)
미국	Placing Concrete by Puming Method (ACI 304)
유럽	BS 8476
중국	월드파이낸셜센터 (492m, 2007) Xita Tower (432m, 2007) 국제금융센터 (408m, 2003) Jinmao Tower (382.5m, 1998)

(나) 고압송 콘크리트의 성능규격 구성

국내·외 규격 자료를 바탕으로 표 3-2-1-24와 같이 성능 규격을 구성하였으며, 각 구성에 대한 국내·외 기준들을 분석하였다. 이를 통해 각각의 구성에 대한 세부 내용을 파악하고 고압송 콘크리트의 성능 규격을 도출하고자 하였다.

표 3-2-1-43. 고압송 콘크리트 성능규격 구성 및 국내·외 기준 현황

구성			주요내용	한국	일본	미국
1. 총론						
2. 재료 및 배합	2.1 재료	2.1.1 시멘트 및 혼화재료	시멘트	○	○	○
			혼화재	○	○	○
			혼화제	○	○	X
		2.1.2 굵은골재 최대치수 및 미립분 함유량	굵은골재 최대치수	○	○	○
			굵은골재 조립률	○	○	X
			미립분 함유량	○	○	○
	2.2 배합	2.2.1 슬럼프 플로우	슬럼프 플로우 측정 및 평가	X	○	X
		2.2.2 단위 시멘트량	단위시멘트 함유량	○	○	X
		2.2.3 공기량	공기량	○	○	X
		2.2.4 잔골재율	잔골재율	X	○	X
3. 장비 및 배관	3.1 개요					
	3.2 펌프장비		펌프장비	X	○	X
	3.3 배관		배관	○	○	X
4. 펌프 압송	4.1 개요					
	4.2 관내 압력 손실		관내 압력	○	○	X
	4.3 펌프 압력 산출		펌프압력	○	○	○

(다) 재료 및 배합

① 재료

㉮ 시멘트 및 혼화재료

국내·외 각국의 펌프압송 콘크리트의 시멘트 및 혼화재료는 국가에서 지정하는 시멘트와 혼화재료 규격을 활용하고 있으며, 이에 적합한 시멘트와 혼화재료를 사용하도록 하고 있다. 따라서 시멘트 및 혼화재료 사용에 있어서 국내의 규정에 적합한 시멘트와 혼화재료를 사용하는 것이 적합할 것으로 판단된다. 표 3-2-1-44와 45은 국내·외 시멘트 및 혼화재료 규격을 나타낸 것이다.

표 3-2-1-44. 국가별 시멘트 규격

구분	종류 및 규격
한국	포틀랜드 시멘트(KS L 5201), 고로슬래그 시멘트(KS L 5210), 플라이애시 시멘트(KS L 5211)
일본	포틀랜트 시멘트(JIS R 5210), 저발열 포틀랜드 시멘트(JIS R 5210), 발열 시멘트(JIS R 5211), 실리카 시멘트(JIS R 5210), 플라이애시 시멘트(JIS R 5213)
미국	포틀랜드 시멘트 (ASTM C 150)

표 3-2-1-45. 국가별 혼화재료의 규격

구분	혼화재 규격	혼화제 규격
한국	고로슬래그(KS F 2563) 플라이애시(KS L 5405) 실리카흄(KS F 2567)	고성능 AE 감수제(KS F 2560) AE 감수제(KS F 2560)
일본	고로슬래그(JIS A 6206) 플라이애시(JIS A 6201) 실리카흄(JSCE D 106)	고성능 AE 감수제(JASS ST-403) AE 감수제(JIS A 6204)
미국	고로슬래그(ASTM C 989, AASHTO M 302) 플라이애시(ASTM C 618, AASHTO M 295) 실리카흄(ASTM C 1240, AASHTO M 307)	-

㉯ 굵은 골재 최대치수 및 미립분 함유량

굵은 골재 최대치수는 콘크리트의 강도 및 압송 높이에 따라 10~40 mm를 사용할 수 있는 것으로 분석되었으며, 본 연구단에서 사용하고자 하는 25 mm를 사용하여도 적합할 것으로 분석되었다. 다만, 압송 전·후의 물성변화와 펌

프압송성 및 품질의 균질성에 대해 충분히 검토가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

일반적으로 콘크리트의 미립분 함유량은 콘크리트의 단위수량을 증가시켜 강도저하의 원인이 되는 것으로 알려져 있으나 펌프압송용 콘크리트에 있어서 미립분은 윤활제 역할을 하므로 일정비율 포함하는 것을 권장하고 있다. 펌프압송용 콘크리트의 미립분은 0.3 mm 이하를 통과한 분체로 한국과 일본에서는 15~35 %, 경량골재에서 20~30 %, 미국에서는 25 % 이상으로 권장하고 있으며, 한국과 독일에서는 최대골재치수에 따라 1 m^3 당 미립분 모르타르의 확보량을 제안하고 있다. 굵은 골재 최대치수 25 mm 를 사용할 경우 1 m^3당 미립분 모르타르 확보량은 420 kg 이상이야 할 것으로 판단된다.

표 3-2-1-46은 굵은 골재 최대치수 및 미립분 함유량과 조립율을 나타낸 것이고 표 3-2-1-47은 한국과 독일에 규정되어있는 굵은 골재 최대치수에 따른 1m^3 당 미립분 권장량을 나타낸 것이다.

표 3-2-1-46. 굵은 골재 최대치수 및 미립분 함유량과 조립율

구분	굵은 골재 최대치수	미립분 함유량 (0.3mm체 통과율)		굵은 골재 조립율
		보통 잔골재	인공 경량골재	
한국	16~25 mm	15~35 %	20~30 %	4.3~4.7
일본	20~40 mm	15~35 %	20~30 %	-
미국	10~38 mm	25 % 이상		2.4~3.0
독일	16~63mm	-		4.3~5.6

표 3-2-1-47. 굵은 골재 최대치수에 따른 1 m^3 당 미립분 권장량

굵은 골재 최대크기 (mm)	1 m^3 당 미립분 양 (kg)	
	한국	독일
8	525	525
16	450	450
25	420	-
32	-	400
63	-	325

② 배합

㉮ 개요

고압송용 콘크리트 배합에 있어서 가장 중요한 변수는 이미 언급한 바와 같이 압송 전·후의 콘크리트 물성변화이다. 압송 전·후의 물성변화가 발생할 경우 강도의 변화 및 펌프 사용 유무에 대한 영향을 미칠 수 있으므로 이에 대한 고려는 반드시 이루어져야 할 것이다. 국외 규격에서는 이를 충분히 고려하기 위해 많은 실험을 통해 규격을 제정하였으며, 특히 일본에서 많은 분석이 이루어진 것으로 나타났다. 본 절에서는 압송 전·후의 물성변화 억제를 최대한 고려한 물성을 분석하여 결과를 도출하였다.

㉯ 슬럼프 플로우

슬럼프 플로우는 일반적으로 작업성에 중요한 영향을 미치는 인자이지만, 고압송용 콘크리트에 있어서 펌프 압송성에도 영향을 미치는 주요 인자이다. 이에 대한 자세한 분석은 일본이 가장 앞선 것으로 나타났다.

표 3-2-1-48에 나타낸 바와 같이 일본에서는 압송거리가 100 m 일 때, 최소 시멘트량 290 kg/m^3 이상과 슬럼프의 경우 8~12 cm 로 제시되어 있다.

표 3-2-1-48. 일본의 압송거리 100m에 대한 배합설계

압송거리 (m)	배관직경 (mm)	굵은 골재치수 (mm)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	최소시멘트량 (kg/m^3)
100	125 또는 150	20 또는 25	8~12	4	290
비고	단위시멘트량이 430 이상 되면 점성이 증대되어 펌프 압송성이 저하됨				

㉰ 단위시멘트량

일본의 콘크리트펌프시공지침에 의하면 배관직경 및 압송거리에 따른 단위시멘트량 값이 큰 쪽의 사용을 권장하고 있다. 또한 배관직경이 커질수록 단위시멘트량을 적게 사용하고, 압송거리가 길어질수록 단위시멘트량이 많이 사용되는 것으로 나타났다.

표 3-2-1-49에 나타난 바와 같이 일본에서는 수평환산길이에 따른 단위시멘트량이 보통콘크리트는 최소 280 kg/m^3, 경량콘크리트는 최소 350~360 kg/m^3 이상이 되어야만 모든 관경에서의 압송이 양호할 것으로 제시되고 있다. 따라서 보통콘크리트의 경우 280 kg/m^3 이상, 경량콘크리트는 300 kg/m^3~400 kg/m^3 이하이여야 압송이 양호 할 것으로 판단된다.

표 3-2-1-49. 수평환산길이에 따른 단위시멘트량 (일본)

콘크리트의 종류	배관 직경(mm)			수평환산길이(m)			
	100	125	150	60 미만	60 이상 150 미만	150 이상 300 미만	300 이상
보통 콘크리트	300	290	280	280	290	300	300
경량 콘크리트	340	320	300	300	300	320	340

㉱ 공기량

기존의 분석에 의하면 공기량은 일반적으로 펌프 압송에 의해 감소하는 것으로 나타났다. 약 30분 정도의 운반 중에 0.5% 감소되며, 압송거리 100 m의 경우 감소량이 미소하지만 150 m의 경우 0.5~1.0% 정도 감소가 되므로 배합설계시 공기량 저하를 고려하여 3±1 %가 적당할 것으로 판단된다. 표 3-2-1-50은 일본에서 규정하는 공기량의 표준범위를 나타낸 것이다.

표 3-2-1-50. 일본 펌프시공지침에 따른 공기량의 표준범위

구분	보통콘크리트 (일반골재)	고로슬래그콘크리트 (일반골재)	인공경량골재 콘크리트
공기량	굵은 골재 최대치수에 따라 콘크리트용적의 3~6% 표준으로 함	굵은 골재 최대치수에 따라 콘크리트용적의 3~6% 표준으로 함	굵은 골재 최대치수에 따라 콘크리트용적의 4~7% 표준으로 함

㈐ 잔골재율

일본의 규격에 의하면 잔골재율은 배관 직경에 따라 범위를 두고 있으며, 이에 미립분 함유량을 나타내고 있다. 따라서 배합설계에서 결정된 잔골재율과 배관 직경 및 미립분 함유량에 대한 고찰이 필요할 것으로 판단된다.

표 3-2-1-51. 배관직경에 따른 잔골재율 및 미립분량 (일본)

배관직경 (mm)	잔골재율 (%)	미립분량 (l/m^3)
125	40~50	320 이상
150	45~50	300 이상

(2) 초장대 교량에 적합한 매스콘크리트 성능규격 개발

(가) 일반 사항

저발열 시멘트를 사용하는 매스콘크리트는 초장대 교량의 주탑, 앵커리지와 기초 등의 비교적 규모가 큰 콘크리트 구조물에 적용되므로 매스콘크리트 구조물 관련기준을 고찰하여 비교 분석하였다. 기존의 관련기준 분석내용을 토대로 초장대교량 매스콘크리트 구조물 시공지침(안)을 구축하였다.

(나) 설계기준 비교분석

본 연구에서는 대표적인 설계코드로써 국내의 콘크리트표준시방서(2009), 일본토목학회(JSCE) 콘크리트표준시방서(2007), 일본콘크리트공학협회(JCI)의 콘크리트표준시방서 및 미국 ACI 207위원회의 지침사항을 비교 분석하였다.

① 균열지수

㉮ 국내 콘크리트표준시방서(2007)

우리나라 콘크리트표준시방서(2007)에서는 매스콘크리트의 온도균열 발생에 대한 검토는 온도균열지수에 의해 평가할 것을 제시하고 있다.

$$I_{cr} = \frac{f_{sp}(t)}{f_{(t)}} \qquad (3\text{-}2\text{-}1\text{-}13)$$

여기서, $f_{sp}(t)$: 재령 t일에서의 콘크리트 쪼갬 인장강도로서, 재령 및 양생온도를 고려하여 계산한다. (MPa)

$f_t(t)$: 재령 t일에서의 수화열에 의해 생긴 부재 내부의 온도응력 최대 (MPa)

㉯ 일본토목학회 콘크리트표준시방서(2007)

일본토목학회(JSCE) 콘크리트표준시방서(2007)에서는 콘크리트 공시체의 인장강도와 구조물의 인장 주응력(산정값)의 비를 균열 지수로 정의하고, 균열 발생의 유무는 균열 발생 확률의 한계치에서 정해진 균열 지수에 의해서 조사한다.

$$I_{cr(t)} \geq \gamma_{cr} \qquad (3\text{-}2\text{-}1\text{-}14)$$

여기서, $I_{cr}(t)$: 균열지수

$I_{cr}(t) = f_{tk}(t)/\sigma_t(t)$

$f_{tk}(t)$: 재령 t일에서의 콘크리트의 인장강도

$\sigma_t(t)$: 재령 t일에서의 콘크리트 최대인장응력

γ_{cr} : 균열발생확률에 관한 안전계수. 일반적으로 1.0~1.8.

일반적인 배근 구조물에 대한 표준적인 γ_{cr}와 균열발생 확률의 참고값은 다음 표 3-2-1-52와 같다.

표 3-2-1-52. 표준 균열발생 확률과 안전계수(γ_{cr})의 참고값

구 분	균열 발생 확률	안전 계수 (γ_{cr})
균열을 방지하고 싶은 경우	5%	1.75 이상
균열의 발생을 가능한 제한하고 싶은 경우	25%	1.45 이상
균열의 발생을 허용하지만, 균열폭이 너무 크게 되지 않도록 제한하는 경우	85%	1.0 이상

㈐ 일본콘크리트학회 매스콘크리트 균열제어지침

일본콘크리트학회(JCI) 매스콘크리트 균열제어지침(2008)에서는 온도균열을 방지하는 경우 및 온도균열폭을 제어하는 경우 등 두 가지로 구분하여 균열조사를 제시하고 있으며, 온도균열을 방지하는 경우는 다음과 같다.

$$\frac{P_c}{P_t} \leq 1.0 \qquad (3\text{-}2\text{-}1\text{-}15)$$

여기서, P_t: 온도균열발생확률 한계값 (=통상 5%)

P_c: 온도균열발생확률해석값 (%)

온도균열발생확률은 균열지수 I_{cr}에 의해 산정한다.

$$P(I_{cr}) = \left[1-\exp\left\{-\left(\frac{I_{cr}}{0.92}\right)^{-4.29}\right\}\right]\times 100 \qquad (3\text{-}2\text{-}1\text{-}16)$$

$$I_{cr} = \frac{f_t(t_e)}{\sigma(t_e)} \qquad (3\text{-}2\text{-}1\text{-}17)$$

여기서, $f_t(t_e)$: 유효재령 t_e에서의 인장강도 (쪼갬인장강도 기준)

$\sigma(t_e)$: 유효재령 t_e에서의 최대 주인장응력

또한, 온도균열발생폭을 제어하는 경우는 다음과 같다.

$$\gamma_i \frac{w_c}{w_a} \leq 1.0 \qquad (3\text{-}2\text{-}1\text{-}18)$$

여기서, w_a : 온도균열폭을 제어하는 경우의 허용균열폭 (mm)

w_c : 온도균열폭의 예측값 (mm)

γ_i : 안전계수로서 일반적으로 1.0으로 한다.

균열지수(I_{cr})에 의해 온도균열폭을 예측할 수 있으며, 이는 다음과 같다.

$$w_c = \gamma_a \left(\frac{-0.071}{p} \right) \times (I_{cr} - 2.04) \qquad (3\text{-}2\text{-}1\text{-}19)$$

여기서, p 는 철근비(대상콘크리트 단면적에 대한 균열발생방향과 직교하는 방향의 철근단면적 비, %), 적용범위는 0.2~0.9%로 한다. I_{cr}는 온도균열지수로써 1.85이하로 한다. γ_a는 온도균열폭을 평가하기 위한 안전계수이며, 구조물의 요구성능에 따라 1.0~1.7로 한다. 철근비가 0.6% 이상일 때는 1.0으로 하며, 심한 부식성환경에서는 철근비가 0.6~0.25%일 때는 1.0~1.7 사이에서 보간하여 적용한다. 그 이외의 환경에서는 1.0으로 한다.

㈑ ACI 207 위원회

ACI 207 위원회에서는 균열지수에 대한 규정은 없으며, 인장강도와 인장응력과의 대소 비교 또는, 인장변형능력과 인장변형률과의 대소 비교를 통해 균열가능성 여부를 언급하고 있다.

② 단열온도상승 특성

㈎ 콘크리트표준시방서

콘크리트의 단열온도 상승 특성은 사용하는 시멘트의 종류, 단위시멘트량, 콘크리트 타설온도 등을 고려하여 적절한 방법으로 정하여야 한다. 일반적으로 콘크

리트의 단열온도 상승은 단열온도 상승시험을 통하여 얻는 것을 원칙으로 한다. 그러나 단열온도상승시험을 수행하지 못하는 경우에 대하여 단열온도특성은 다음 식으로 주어지고 있다.

$$Q(t) = Q_{\infty}(1-e^{-rt}) \qquad (3\text{-}2\text{-}1\text{-}20)$$

여기서, Q_{∞} : 최종 단열온도 상승량(℃)으로서 시험에 의해 정해지는 계수

r : 온도상승속도로서 시험에 의해 정해지는 계수

$Q(t)$: 재령 t일에서 단열온도 상승량 (℃)

계산이나 기존의 자료에 의해 단열온도 상승특성을 추정할 경우에는 시멘트의 종류, 단위시멘트 량 및 타설온도를 고려하여 회귀식에 의해 각 상수를 추정할 수 있다.

표 3-2-1-53. Q_{∞} 및 r의 표준값

시멘트 종류	타설온도 (℃)	$Q(t) = Q_{\infty}(1-e^{-rt})$			
		$Q_{\infty}(C) = aC+b$		$r(C) = gC+h$	
		a	b	g	h
보통포틀랜드 시멘트	10	0.12	11.0	0.0015	0.135
	20	0.11	13.0	0.0038	-0.036
	30	0.11	12.0	0.0040	0.337
중용열포틀랜드시멘트	10	0.11	6.0	0.0003	0.303
	20	0.10	9.0	0.0015	0.279
	30	0.11	9.0	0.0021	0.299
조강포틀랜드 시멘트	10	0.13	15.0	0.0016	0.478
	20	0.13	12.0	0.0025	0.650
	30	0.13	10.0	0.0014	1.720
고로슬래그 시멘트	10	0.11	14.0	0.0014	0.073
	20	0.10	15.0	0.0025	0.207
	30	0.10	15.0	0.0035	0.332
플라이애쉬 시멘트	10	0.15	-3.0	0.0007	0.141
	20	0.12	8.0	0.0028	-0.143
	30	0.11	11.0	0.0030	0.059

② 일본토목학회 콘크리트표준시방서

콘크리트의 단열온도상승 곡선은 사용하는 시멘트의 종류, 단위시멘트량, 콘크리트 타설온도 등을 고려한 추정식을 제안하고 있으며, 제안식은 우리나라 콘크리트 표준시방서(2007)에 적용되고 있는 상황이다.

③ 일본콘크리트학회 매스콘크리트 균열제어지침

콘크리트의 단열온도 상승특성은 사용하는 시멘트의 종류, 단위시멘트량, 콘크리트 타설온도 등을 고려하여 다음의 식으로 정하도록 한다.

$$Q(t) = Q_{\infty}\left(1-e^{-r(t-t_{0,Q})}\right) \qquad (3\text{-}2\text{-}1\text{-}21)$$

여기서, t : 재령 (일)

$Q(t)$: 최종 단열온도상승량 (℃)

r : 단열온도상승속도에 관한 계수

$t_{0,Q}$: 발열개시재령 (일)

단, 저열시멘트의 경우에는 콘크리트의 단열온도 상승곡선을 다음 식으로 정하도록 한다.

$$Q(t) = Q_{\infty}\left(1-e^{-r\,(t-t_{0,Q})^{s}}\right) \qquad (3\text{-}2\text{-}1\text{-}22)$$

여기서, t : 재령 (일)

$Q(t)$: 최종 단열온도상승량 (℃)

r : 단열온도상승속도에 관한 계수

$t_{0,Q}$: 발열개시재령 (일)

시멘트의 종류, 단위시멘트 량 및 타설온도를 고려하여 회귀식에 의해 각 상수를 추정할 수 있다.

표 3-2-1-54. JCI 기준에서의 단열온도상승곡선

시멘트의 종류	근사식	$250kg/m^3 \le W_c \le 400kg/m^3$	
보통 포틀랜드 시멘트	$Q_\infty = a + b \times T_a$	$a = 17.5 + 0.113 \times w_c$	$b = -0.146 + 0.000308 \times w_c$
	$r = a + b \times T_a$	$a = -0.426 + 0.00207 \times w_c$	$b = 0.0471 + 0.0000188 \times w_c$
	$t_{0,Q} = a \times \exp(-b \times T_a)$	$a = 0.832 - 0.000531 \times w_c$	$b = 0.0482 + 0.000068 \times w_c$
중용열 포틀랜드 시멘트	$Q_\infty = a + b \times T_a$	$a = 8.0 + 0.118 \times w_c$	$b = 0.0709 - 0.00016 \times w_c$
	$r = a + b \times T_a$	$a = -0.101 + 0.000811 \times w_c$	$b = 0.00679 + 0.0000631 \times w_c$
	$t_{0,Q} = a \times \exp(-b \times T_a)$	$a = 1.02 - 0.000867 \times w_c$	$b = 0.0493 - 0.0000295 \times w_c$
저열 포틀랜드 시멘트	$Q_\infty = a + b \times T_a$	$a = 12.2 + 0.0912 \times w_c$	$b = 0.0946 - 0.000159 \times w_c$
	$r = a + b \times T_a$	$a = 0.218 + 0.0003 \times w_c$	$b = -0.00179 + 0.0000598 \times w_c$
	$s = a + b \times T_a$	$a = 0.302 + 0.00104 \times w_c$	$b = 0.00293 - 0.0000216 \times w_c$
	$t_{0,Q} = a \times \exp(-b \times T_a)$	$a = 1.178 - 0.00115 \times w_c$	$b = 0.0503 - 0.00000289 \times w_c$
조강 포틀랜드 시멘트	$Q_\infty = a + b \times T_a$	$a = 17.5 + 0.113 \times w_c$	$b = -0.106 + 0.0000257 \times w_c$
	$r = a + b \times T_a$	$a = -0.601 + 0.0031 \times w_c$	$b = 0.0989 - 0.0000688 \times w_c$
	$t_{0,Q} = a \times \exp(-b \times T_a)$	$a = 0.607 - 0.000388 \times w_c$	$b = 0.0158 + 0.000188 \times w_c$
고로 시멘트 B종	$Q_\infty = a + b \times T_a$	$a = 17.9 + 0.115 \times w_c$	$b = -0.149 + 0.000314 \times w_c$
	$r = a + b \times T_a$	$a = -0.325 + 0.00156 \times w_c$	$b = 0.0216 + 0.000039 \times w_c$
	$t_{0,Q} = a \times \exp(-b \times T_a)$	$a = 0.279 + 0.000795 \times w_c$	$b = 0.0693 + 0.0000904 \times w_c$
플라이 애쉬 시멘트 B종	$Q_\infty = a + b \times T_a$	$a = 3.03 + 0.138 \times w_c$	$b = 0.0741 - 0.00016 \times w_c$
	$r = a + b \times T_a$	$a = -0.0212 + 0.00033 \times w_c$	$b = 0.00762 + 0.00013 \times w_c$
	$t_{0,Q} = a \times \exp(-b \times T_a)$	$a = 0.526 - 0.00022 \times w_c$	$b = 0.0963 - 0.00007 \times w_c$ $b = 0.0963 - 0.00007 \times w_c$

주) 여기서, T_a : 콘크리트 타설온도(℃), W_c : 단위시멘트량 (kg/m^3)

저열시멘트의 단열온도상승곡선은 $Q(t) = Q_\infty \left(1 - e^{-r\,(t - t_{0,Q})^s}\right)$이며, s는 단열온도상승속도에 관한 계수이다.

④ ACI 207 위원회

28일 단열온도상승곡선은 다음 식으로 계산한다.

$$H_a = \frac{1.8 h_g \overline{w_c}}{0.22 \times 150 \times 27} \qquad (3\text{-}2\text{-}1\text{-}23)$$

여기서, H_a : 단열온도상승량

h_g : 수화열에 의한 28일 시멘트 발열량 (cal/g)

$\overline{w_c}$: 단위시멘트 중량 (lb/yd^3)

표 3-2-1-55. 콘크리트의 역학적 특성값 비교

항 목	물성값				
탄성계수 (MPa)	JCI	$E_c(t_e) = 6300 \cdot f_c'(t_e)^{0.45}$			
	JSCE	$E_c(t_e) = 4700 \cdot \sqrt{f_c'(t)}$			
	KCI	$E_c(t) = 8500 \cdot \sqrt[3]{f_{cu}}$			
압축강도 (MPa)	JCI	$f_c'(t_e) = \frac{t_e - s_f}{a + b(t_e - s_f)} f'_{c28}$			
		시멘트 종류	a^{*1}	b^{*1}	s_f
		보통포틀랜드시멘트	3.837	0.861	0.37
		중용열포틀랜드시멘트	9.055	0.673	0.42
		저열포틀랜드 시멘트	13.517	0.507	0.50
		조강포틀랜드 시멘트	2.407	0.912	0.30
		고로슬래그 시멘트	7.117	0.741	0.42
		플라이애쉬 시멘트	7.000	0.746	0.47
	JSCE	$f_c'(t) = \frac{t}{a + b \cdot t} \cdot f'_{ck} \cdot d_{(28)}$			
		시멘트 종류	a	b	$d_{(28)}$
		보통포틀랜드 시멘트	4.5	0.95	1.11
		중용열포틀랜드 시멘트	6.2	0.93	1.15
		저열포틀랜드 시멘트	–	–	–
		조강포틀랜드 시멘트	2.9	0.97	1.07
		고로슬래그 시멘트	$(6.2)^{*2}$	$(0.93)^{*2}$	$(1.15)^{*2}$
		플라이애쉬 시멘트	–	–	–
	KCI	$f_{cu}(t) = \frac{t}{a + b \cdot t} d_i \cdot f_{ck}$			
		시멘트 종류	a	b	d_i
		보통포틀랜드 시멘트	4.5	0.95	1.11
		중용열포틀랜드 시멘트	6.2	0.93	1.15

<table>
<tr><td rowspan="9"></td><td rowspan="4"></td><td>저열포틀랜드 시멘트</td><td>16.2</td><td>0.82</td><td>1.40</td></tr>
<tr><td>조강포틀랜드 시멘트</td><td>2.9</td><td>0.97</td><td>1.07</td></tr>
<tr><td>고로슬래그 시멘트</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td>플라이애쉬 시멘트</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td rowspan="5">ACI</td><td colspan="4">$f_c(t)=\frac{t}{a+\beta\times t}f'_e$</td></tr>
<tr><td>양생방법</td><td>시멘트</td><td>a</td><td>β</td></tr>
<tr><td rowspan="2">습윤방법</td><td>Ⅰ종</td><td>4.0</td><td>0.85</td></tr>
<tr><td>Ⅲ종</td><td>2.3</td><td>0.92</td></tr>
<tr><td rowspan="2">증기양생</td><td>Ⅰ종</td><td>1.0</td><td>0.95</td></tr>
<tr><td>Ⅲ종</td><td>0.70</td><td>0.98</td></tr>
<tr><td rowspan="4">인장강도
(MPa)</td><td>JCI</td><td colspan="4">$f_t(t_e)=0.13\cdot f'_c(t_e)^{0.85}$</td></tr>
<tr><td>JSCE</td><td colspan="4">$f'_{tk}(t)=0.44\cdot\sqrt{f'_c(t)}$</td></tr>
<tr><td>KCI</td><td colspan="4">$f_{sp}=0.44\sqrt{f_{cu}}$</td></tr>
<tr><td>ACI</td><td colspan="4">$f_t=0.6\sqrt{f_c}$</td></tr>
<tr><td rowspan="3">유효
탄성계수
(크리프효
과)
(MPa)</td><td>JCI</td><td colspan="4">$E_c(t_e)=6300\cdot f_c'(t_e)^{0.45}$
온도 상승시 = 0.42
최고온도부터 1일후 ϕ=0.65</td></tr>
<tr><td>JSCE</td><td colspan="4">$E_c(t_e)=4700\cdot\sqrt{f_c'(t)}$
재령 3일까지 ϕ=0.73
재령 5일이후 ϕ=1
재령3일~5일 사이는 선형보간</td></tr>
<tr><td>KCI</td><td colspan="4">$E_e(t)=\Psi(t)\cdot 4700\cdot\sqrt[3]{f_{cu}(t)}$
재령 3일까지 : $\Psi(t)$ = 0.73
재령 5일이후 : $\Psi(t)$ = 1.0
재령3일~5일사이는 직선보간</td></tr>
</table>

*1 ; 재령 28일 강도를 30MPa로 산출

*2 ; 중용열 시멘트의 값 사용

(3) 수중불분리 콘크리트의 성능규격 개발

(가) 일반 사항

수중불분리 콘크리트는 기존 공법과 달리 수중불분리 혼화제 첨가에 의해 콘

크리트의 점성을 높여서 재료분리에 대한 저항성을 높이는 것이다. 이를 위해 수중에 타설된 콘크리트 품질의 신뢰성이 비약적으로 향상될 뿐만 아니고 시공지역의 오염을 방지하고 시공환경의 보전의 효과를 발휘한다. 또한 시공방법은 종래의 트래미 공법과 콘크리트 펌프공법을 병행할 수 있다.

(나) 수중불분리 콘크리트 품질

① 굳지 않은 콘크리트의 품질

㉮ 수중불분리 콘크리트는 소유의 수중불분리성과 적절한 유동성을 갖지 않으면 안 된다.

㉯ 수중불분리성은 수중 기중 강도비에 의해 나타낸다.

㉰ 유동성은 슬럼프 플로우에 의해 나타낸다.

㉱ 수중불분리 콘크리트는 필요에 따라서 소유의 충전성과 셀프레벨링을 갖지 않으면 안 된다.

② 경화콘크리트의 강도

수중불분리 콘크리트 강도는 일반적으로 수중제작 공시체 재령 28일에 있어서 시험체를 기준으로 한다.

(다) 재 료

① 시멘트

보통 포틀랜드 시멘트, 조강 포틀랜드 시멘트, 고로시멘트와 플라이애쉬 시멘트는 수중불분리 콘크리트로서의 품질을 확인하고, 사용방법을 충분히 검토하지 않으면 안 된다.

② 잔골재

잔골재는 콘크리트 표준시방서에 적합한 것을 사용해야 한다. 철근콘크리트 시공에 해사를 이용하는 경우, 염화물량의 허용한도는 염화물 이온량으로 잔골재 절대건조중량의 0.02% 이하이어야 한다. 잔골재는 알칼리 실리카반응성 시험의 결과가 무해한 것으로 판정되어야 한다.

③ 굵은 골재

굵은 골재는 콘크리트 표준시방서에 적합한 것을 사용해야 한다. 굵은 골재는 알칼리 실리카반응성 시험의 결과가 무해한 것으로 판정되어야 한다.

④ 수중불분리 혼화제

수중불분리 혼화제는 토목학회 규준 콘크리트용 수중불분리 혼화제 품질규격(안)에 적합한 것이라야 한다.

⑤ 혼화제

혼화제로서 이용하는 감수제와 AE감수제는 KCI - D102에 적합하고 동시에 수중불분리 혼화제와 병용해서 콘크리트에 악영향을 미치지 않는 것이라야 한다.

(라) 배 합

수중불분리 콘크리트 배합은 콘크리트가 소정의 수중불분리성, 강도, 유동성과 내구성을 가질 수 있도록 시험에 의해서 정해져야만 한다.

① 배합강도

수중불분리 콘크리트는 KCI-CT102에 따라서 제작한 수중 제작 공시체의 재령 28일의 압축강도를 배합강도로서 설정하여야한다.

② 물-시멘트비

㉮ 물-시멘트비는 콘크리트의 소정의 강도 및 내구성을 고려해서 정해져야만 한다. 물-시멘트비는 기준으로서 재령에 대한 시멘트-물비(C/W)와 수중제작공시체의 압축강도와의 관계식에 있어서 배합강도에 상당하는 시멘트-물비 값의 역수로 한다. 배합강도는 설계기준강도에 적당한 계수를 곱해서 할증한 것으로 한다. 이 계수는 현장에 있어서 예상되는 콘크리트 압축강도의 변동계수에 따라서 수중제작 공시체의 압축강도 시험치가 설계기준강도에 못 미칠 확률이 5% 이하가 되도록 정하는 것으로 일반적으로 곡선 $\alpha = \frac{1}{1 - \frac{1.64}{100} V}$ 에 의해 구한 값이다.

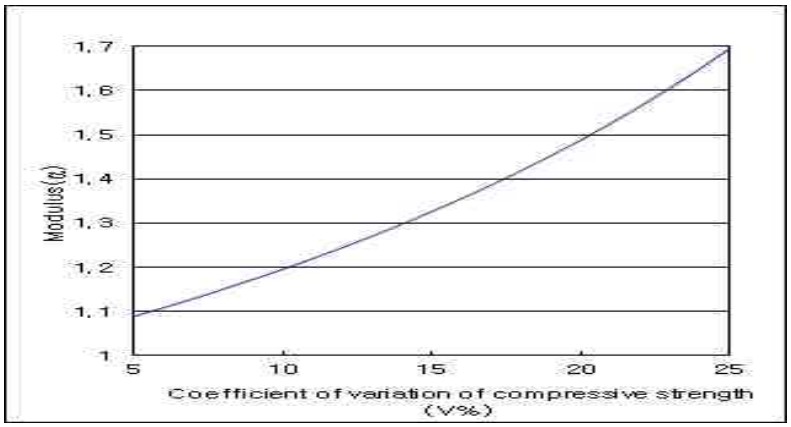


그림 3-2-1-157. 콘크리트 압축강도에 따른 변동계수

㉯ 철근의 부식작용, 콘크리트의 화학작용 등을 고려해서 물-시멘트비를 정하는 경우에 최대값은 표 3-2-1-56의 값을 표준으로 한다.

표 3-2-1-56. 환경에 따른 콘크리트별 물-시멘트비

콘크리트의 종류 / 환경	무근 콘크리트%	철근 콘크리트%
담수중	65%	55%
해수중	60%	50%

③ 단위수량

단위수량은 수중불분리 혼화제와 고성능 감수제의 사용량을 고려해서 소정의 유동성이 얻어지는 범위 내에서 가능한 작게 되도록 시험에 의해서 정하여야 한다.

④ 단위시멘트량

단위시멘트량은 단위수량과 물-시멘트비로부터 정한다.

⑤ 굵은 골재 최대치수

굵은 골재의 최대치수는 40mm 이하를 표준으로 하고, 부재 최소치수의 1/5과 콘크리트의 피복두께 1/2를 초과하면 안 된다.

⑥ 슬럼프 플로우

슬럼프 플로우는 수중 불분리성 , 충전성, 셀프 레벨링성 등을 고려해서 운반, 타설 등의 작업에 적절한 범위 안에서 정하여야 한다.

표 3-2-1-57. 시공조건에 따른 슬럼프 플로우 범위

시공조건	슬럼프 플로우의 범위(mm)
급경사면의 장석(1:1.5~1:2)의 고결, 사면의 엷은 슬래브(1:8 정도까지)의 시공 등에서 유동성을 적게 하고 싶은 경우	350～400
단순한 형상의 부분에 타설하는 경우	400～500
일반적인 경우, 표준적인 철근 콘크리트 구조물에 타설하는 경우	450～550
복잡한 형상의 부분에 타설하는 경우 특별히 양호한 유동성이 요구되는 경우	550～650

⑦ 잔골재율

잔골재율은 40%를 표준으로 한다.

⑧ 공기량

공기량은 4%이하를 표준으로 한다.

⑨ 수중불분리 혼화제

수중불분리 혼화제의 단위량은 수중불분리 콘크리트에 요구되는 품질에 따라서 적절한 값을 정한다.

(마) 콘크리트의 제조

① 계량

㉮ 각 재료의 계량방법과 계량 장치는 계량 오차 내에 계량 가능하여야 한다.

㉯ 각 재료의 계량장치는 공사시작 전과 공사 중 정기적 점검과 관리하여야 한다.

② 비비기

수중불분리 콘크리트는 점성을 크게 하기 위해 균등질의 수증분리 콘크리트를 제조 분리하는 성질의 강제식 배치 믹서를 이용하는 것을 원칙으로 한다. 시공

전 실제 사용한 믹서를 이용해 계획적으로 배합한 수중불분리 콘크리트를 제조와 소정의 품질의 만족하는 것을 확인 하는 것이 좋다.

㉮ 수중불분리 콘크리트의 비비기는 제조설비가 갖추어진 배치플랜트에서 물을 투입하기 전 건식으로 20~30초를 비빈 후 전 재료를 투입하여 비비기를 하여야 한다.

㉯ 비비는 시간은 시험에 의해 콘크리트 소요의 품질을 확인하여 정해야 하며, 강제식 믹서의 경우 비비기 시간은 90~80초를 표준으로 한다.

㉰ 수중불분리 콘크리트를 레디믹스트 콘크리트 공장에서 비빌 경우에는 일반적인 지정 사항 이외에 슬럼프 플로, 수중 제작 공시체의 압축강도, 수중•공기중 강도비, 수중 불분리성 혼화제의 종류와 사용량 등을 생산자와 협의하여 정하여야 한다.

㉱ 수중불분리 콘크리트는 일반콘크리트에 비하여 믹서에 걸리는 부하가 크기 때문에 소요 품질의 콘크리트를 얻기 위하여 1회 비비기량은 믹서의 공칭용량의 80퍼센트 이하로 하여야 한다.

(바) 타설

① 일 반

㉮ 콘크리트는 정수에서 수중낙하높이 50cm이하로 타설하는 것을 원칙으로 한다. 수중낙하를 시키면 품질이 저하되는 경향이 있어 가능한 수중낙하를 시키지 않고 타설하는 것이 중요하다. 또한, 어쩔 수 없이 유수상태에서 타설 할 때에는 유속이 5cm/s정도 이하인 조건이다.

㉯ 콘크리트 펌프 또는 트레미를 사용해서 타설하는 것을 원칙으로 한다. 수중낙하높이를 적절히 제어할 수 있고, 콘크리트를 연속으로 공급하는 것이 가능하다.

㉰ 수중유동거리는 5m이하로 하는 것을 원칙으로 한다. 수중불분리 콘크리트는 우수한 유동성을 가지지만, 수중유동거리가 길어지면 도중에 조골재를 내버려 둔 채 선단부는 모르타르분이 많아지기 때문에 불균일한 콘크리트가 된다. 특히, 타설 장소에 철근이 많이 배치되어 있을 경우에는 그 경향이 커진다.

② 콘크리트 펌프를 이용한 압송 및 타설

콘크리트펌프의 압송력은 보통 콘크리트의 2~3배, 타설 속도는 1/2~1/3 정

도 이므로 품질을 저하시키지 않도록 시공계획을 세워야 한다.

③ 트래미를 이용한 타설

㉮ 트래미는 콘크리트가 원활하게 흘러 내려가게 하는 단면을 가지고, 수밀적이어야 한다. 트래미의 안지름은 조골재 최대척도의 8배정도가 필요하며 일반적으로 20~30cm로 한다.

㉯ 트레미를 이용한 타설은 콘크리트의 품질 저하를 발생 시키지 않도록 연속적으로 시행해야 한다. 플런저를 사용하거나 밑뚜껑을 장착한 트래미를 사용하면 좋다. 타설 도중에는 트래미 안을 수중불분리 콘크리트로 채울 필요가 있고, 중단 할 때에는 물의 역류를 막기 위해서 트래미관의 선단을 끼워 맞춘 콘크리트에 묻는 등의 배려가 필요하다.

④ 콘크리트 표면의 보호

수중불분리 콘크리트는, 유수, 파도 등에 의해 시멘트 부분이 유출되거나, 콘크리트가 파여 나가지 않도록 보호해야 된다.

(사) 콘크리트 관리 및 품질검사

① 콘크리트의 관리

㉮ 압축강도에 의한 콘크리트의 관리는 일반적인 경우에는 조기재령에 관한 압축강도에 의해 시행한다. 이 경우 공시체는 수중 제작 공시체로 한다.

㉯ 콘크리트의 관리에 사용되는 압축강도의 1회 시험치는 일반적인 경우 동일 위치에서 채취한 공시체 3개의 압축강도를 평균치로 한다. 시험을 위한 시험자료를 채취하는 시기 및 회수는 일반적인 경우, 1일에 타설 콘크리트 별로 적어도 1회, 또는 구조물의 중요도와 공사의 규모에 의해 연속적으로 타설 콘크리트의 20～100 마다 1회로 한다.

② 콘크리트의 품질 검사

㉮ 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프 플로우 및 공기량의 허용치는 콘크리트의 타설 시 아래와 같은 범위이내여야 한다.

표 3-2-1-58. 굳지 않은 콘크리트의 플로우 및 공기량의 허용치

슬럼프 플로우	$\pm 3.0cm$
공기량	+1.0%

㈏ 수중불분리 콘크리트의 현장품질관리는 아래의 표에 따른다.

표 3-2-1-59. 현장품질 관리

종류	항목	시험・검사 방법	시기・회수	판단기준
타설	물의 유속	시공계획서에 의함	타설 중 적절한 시기	50mm/s 이하
	수중낙하높이			0.5m 이하
	수중 유동거리			5m 이하

라. 경제성 분석

(1) 분석대상 구조물

① 주경간 1,200m 사장교

㉮ (주)서영엔지니어링에서는 「사장교 Prototype 설계 분석 및 기술융합형 최종 성과품 개발」이라는 목표아래 세계 최고 수준의 경쟁력을 갖춘 주경간 1km+ 사장교를 100% 자립 설계할 수 있는 핵심 엔지니어링 기술을 개발하고자 함.

㉯ 이를 위해 1단계 연구기간(1차년도~4차년도)동안에는 먼저 국·내외에서 완공되었거나 시공 중인 사장교에 대한 사례조사를 수행하여 이에 대한 자료 수집 및 분석을 수행하였으며, 도로교설계기준(2010)과 케이블강교량설계지침(2006) 등의 현 설계기준을 적용하여 주경간 1200m급 사장교에 대한 설계를 수행함.

㉰ 또한 개발되고 있는 신뢰도기반 설계지침인 장경간케이블교량설계지침(안)의 내용을 검토하고 수정·보완해야할 항목들을 도출하였으며, 현재 개발 중인 장경간케이블교량설계지침(안)을 적용하여, 설계된 주경간 1200m급 사장교에 대한 검토를 수행함.

② 설계조건 및 구조물 개요

㉮ 주경간 1200m 사장교의 설계는 Prototype 사장교 후보지 조사를 바탕으로, 대상지역을 거제~마산간 연결도로로 결정하였으며, 아래의 표와 같은 조건을 가정하여 설계를 수행함.

표 3-2-1-59. 사장교 설계 조건

구 분	설 계 조 건	구 분	설 계 조 건
대상지역	거제~마산간 연결도로	교량등급	1등급 (설계속도 60km/h, 내진특등급)
평면선형	직선	차 로 수	왕복 4차로
종단구배	I = (+)3.000% ~ (-)3.000%	형하공간	항로 1000m(B) × 40m(H)
횡단구배	I = (-)2.0%	기본풍속	V10 = 36.8m/s
사 각	S = 0°		

㉯ 우선 케이블강교량설계지침(2006)과 도로교설계기준(2010) 등의 현 설계기준

을 적용하여 주경간 1200m 사장교에 대한 설계를 수행하였으며, 구조물의 개요 및 형식 그리고 구조물의 제원은 다음과 같음.

표 3-2-1-60. 사장교 구조물의 개요

구 분	구 조 물 개 요
교 량 형 식	3경간 연속 강바닥판 박스거더 사장교
교 량 연 장	88+102+330+1,200+330+102+88 = 2,240m
교 량 폭 원	1.2+3.0+2@3.6+2.0+2@3.6+3.0+1.2 = 24.8m
케 이 블	PWS 케이블 (Semi-Fan Type)
주 탑	A형 콘크리트 주탑 (중공 8각 단면)
교 각	벽식 콘크리트 교각 (중공 8각 단면)
기 초	현장타설말뚝

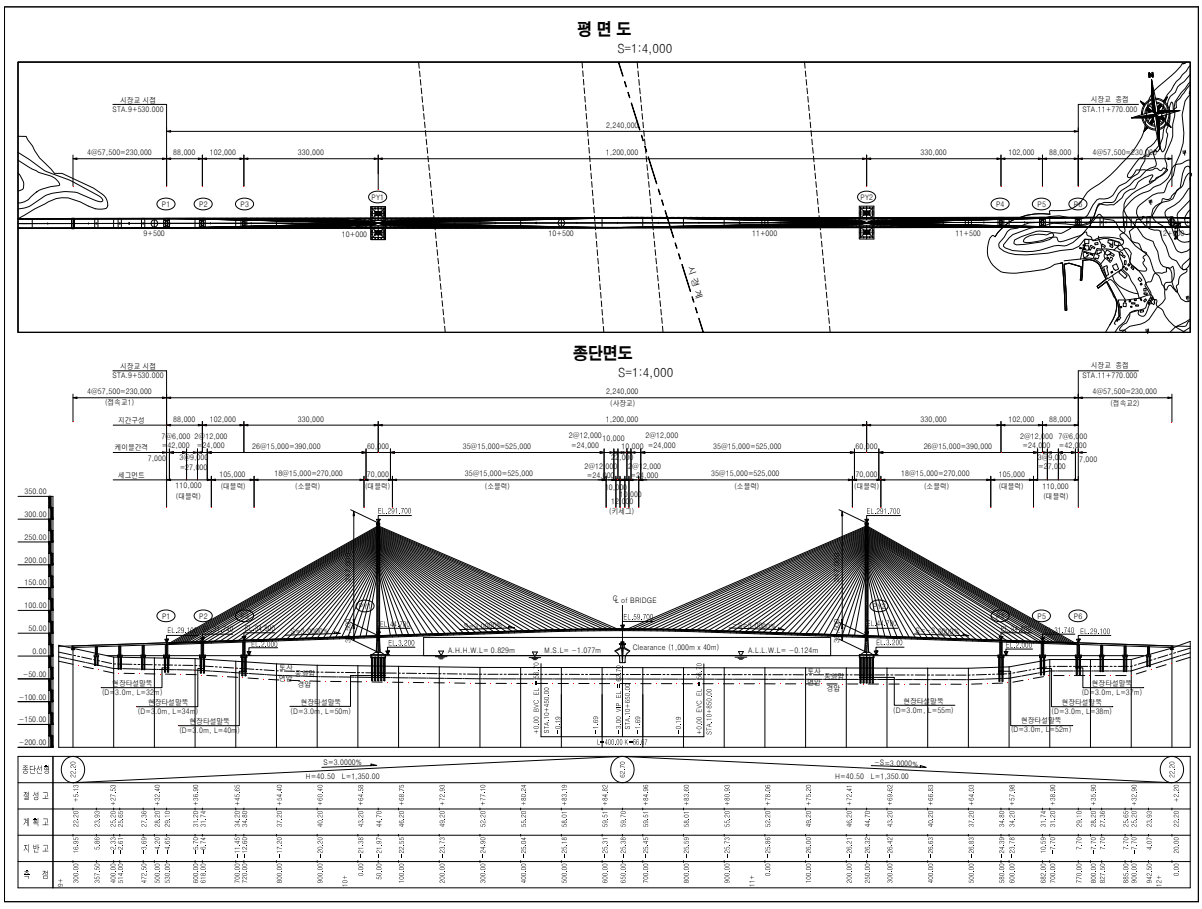


그림 3-2-1-158. 종평면도

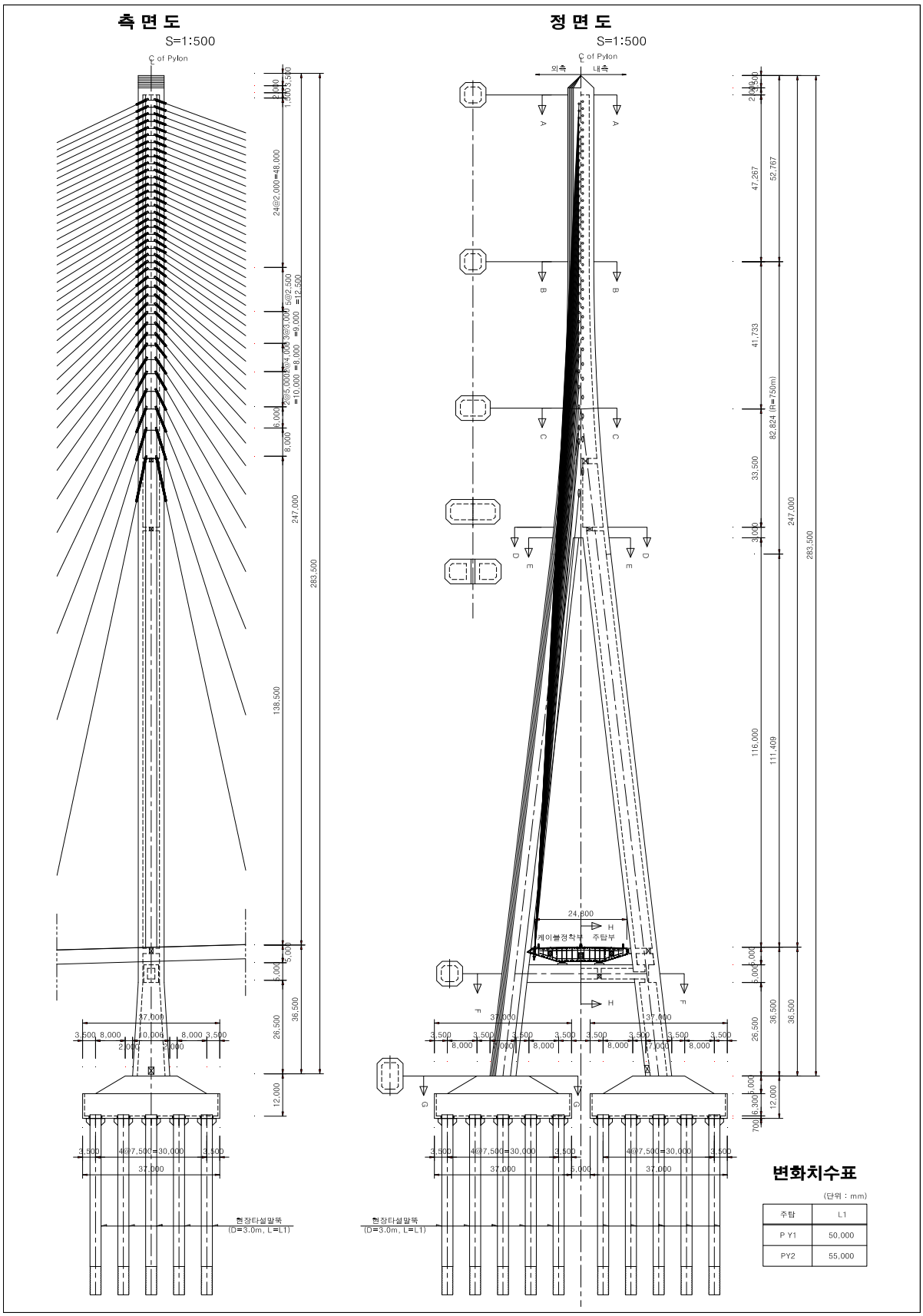


그림 3-2-1-159. 주탑 일반도

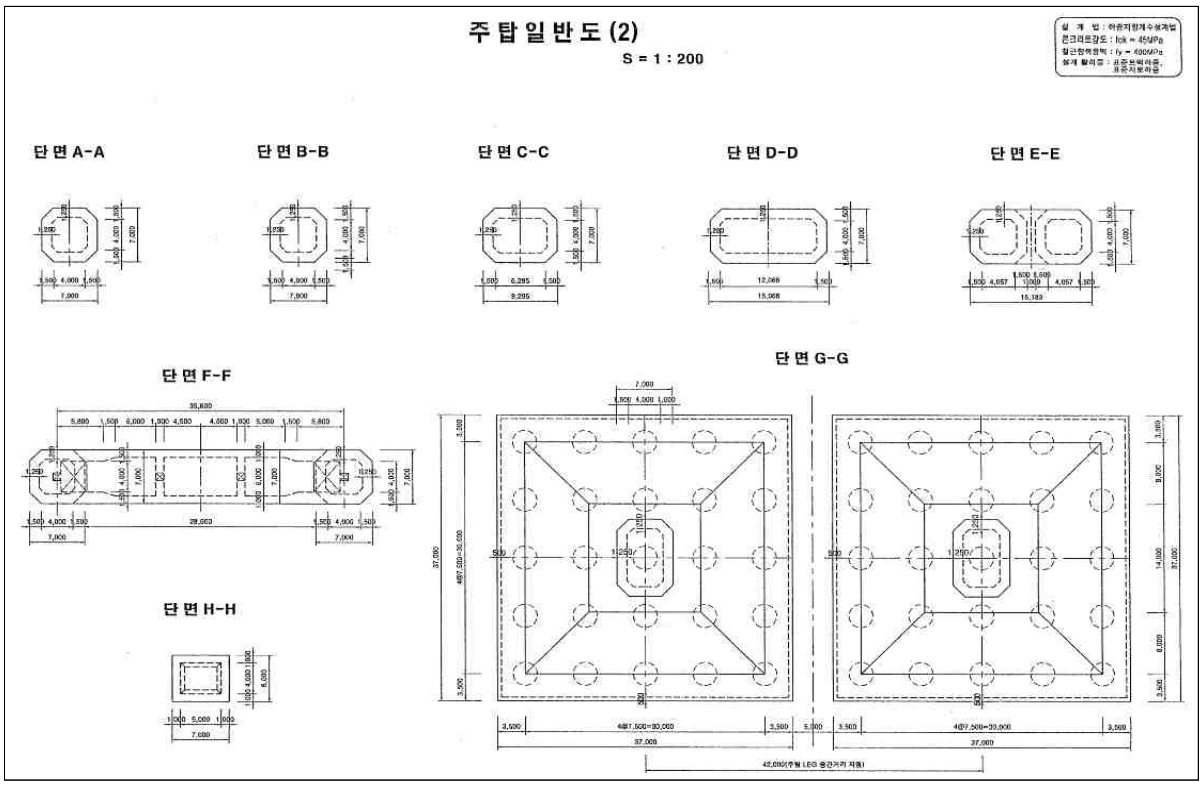


그림 3-2-1-160. 주탑 일반도

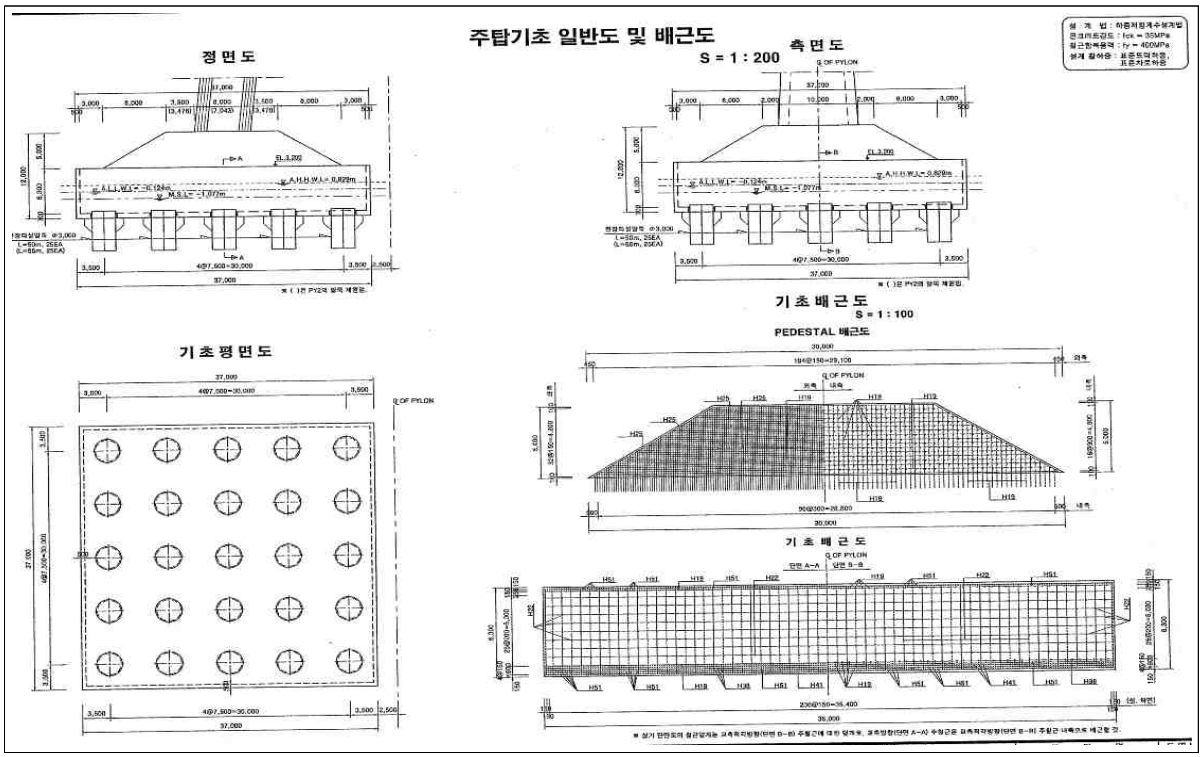


그림 3-2-1-161. 주탑기초 일반도

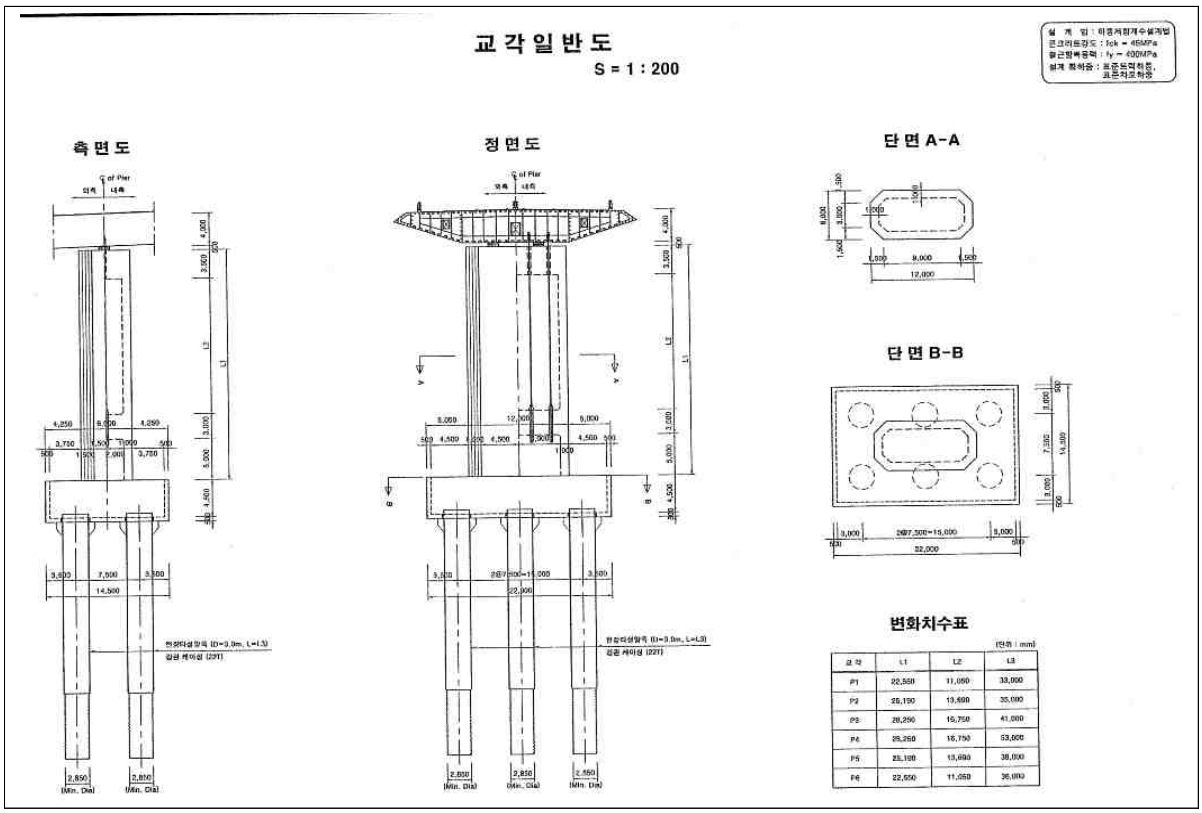


그림 3-2-1-162. 교각 일반도

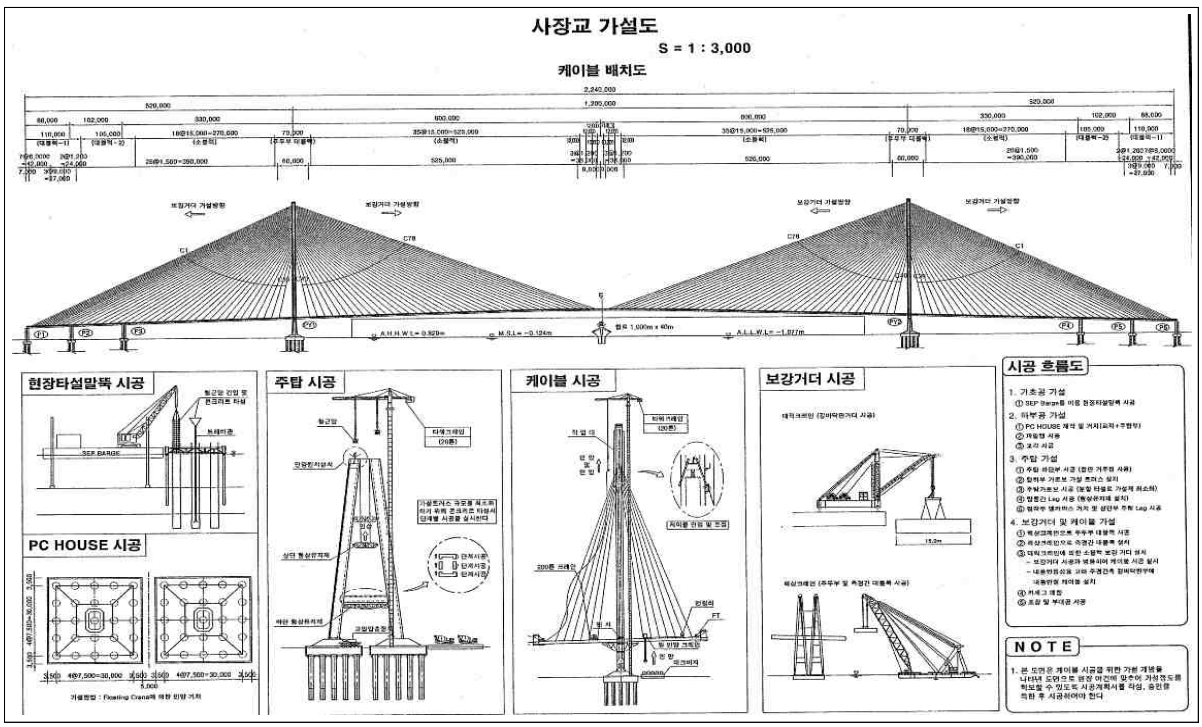


그림 3-2-1-163. 사장교 가설도

③ 사용 재료

㉮ 주경간 1,200m 사장교의 사용재료 중 콘크리트의 강도는 다음과 같음.

주경간교 및 주탑 : $f_{ck} = 45MPa$

교각 : $f_{ck} = 45MPa$

파일캡 및 PC HOUSE : $f_{ck} = 35MPa$

현장타설말뚝 : $fck = 30MPa$

④ 현수교

㉮ (주)유신에서는 「현수교 Prototype 설계 분석 및 기술융합형 최종 성과품 개발」의 연구용역을 수행함.

교량의 경간이 길어질수록 바람에 매우 취약한 특성을 보이므로, 충분한 내풍 안정성을 확보하는 것이 필수적임.

시공 중 발생하는 진동이나 교량 붕괴를 유발하지 않는 국지적인 한정 진동 제어를 위한 장치를 제외하고는 능동적인 제어장치를 사용하지 않고, 교량 전체의 내풍 안정성을 확보하는 것을 목표로 함.

㉯ 설계기준으로는 현재 설계 실무에서 사용하고 있는 도로교설계기준(2010), 케이블강교량설계지침을 적용하되, 국내 설계기준에서 제시하지 못하는 일부 규정은 외국의 설계 기준을 준용함.

⑤ 설계개요

표 3-2-1-61. 초장대 현수교 설계 개요

구분	설계기준
교량형식	2경간 타정식 현수교
연 장	900m + 2,800m = 3,700m
차 로 수	왕복 4차로(차로폭 = 3.75m)
보 강 형	유선형 트윈 강박스 거더(B=32.16m)
주케이블	케이블 간격 31.0m
행 어	CFRC ∅75, ∅80, ∅90(개소당 2본 : 500mm 간격), 종방향 간격 24.0m
주 탑	강·콘크리트 복합주탑(H=421m)
앵커리지	지중정착식(AS공법과 조합), 중력식(PPWS공법과 조합)

⑥ 종단 및 평면 계획

㉮ 초장대교량의 경간 계획에 있어서는 경제적인 효과를 최우선으로 함.

㉯ 우선 해상 기초를 최소화할 수 있도록 부탑(SP)을 노출된 섬에 위치시키고 종점측 주탑(PY2)을 육상 작업이 가능하도록 배치함.

㉰ 또한 형식에 따라 공사비의 변화가 심한 앵커리지를 지중식으로 계획할 수 있도록 최적의 위치에 앵커리지를 배치한 후 전체적인 균형을 맞추며 경간을 계획함.

㉱ 경간계획에 있어 3경간 대칭현수교가 아닌 2경간 비대칭현수교로 계획하였으며, 이는 육상부의 불필요한 상부공사비 증액을 배제하고 종점부 측경간 주케이블의 Free hanging 길이를 가급적 짧게 유도하여 주케이블에 지엽적인 진동문제가 최소화 되도록 함.

㉲ 상부거더의 케이블 지지폭은 31m이며 주경간장 2,800m를 고려할 경우 변장비(L/B, Span-to-width Ratio)는 90으로 일반적인 현수교에 비해 크게 적용함.

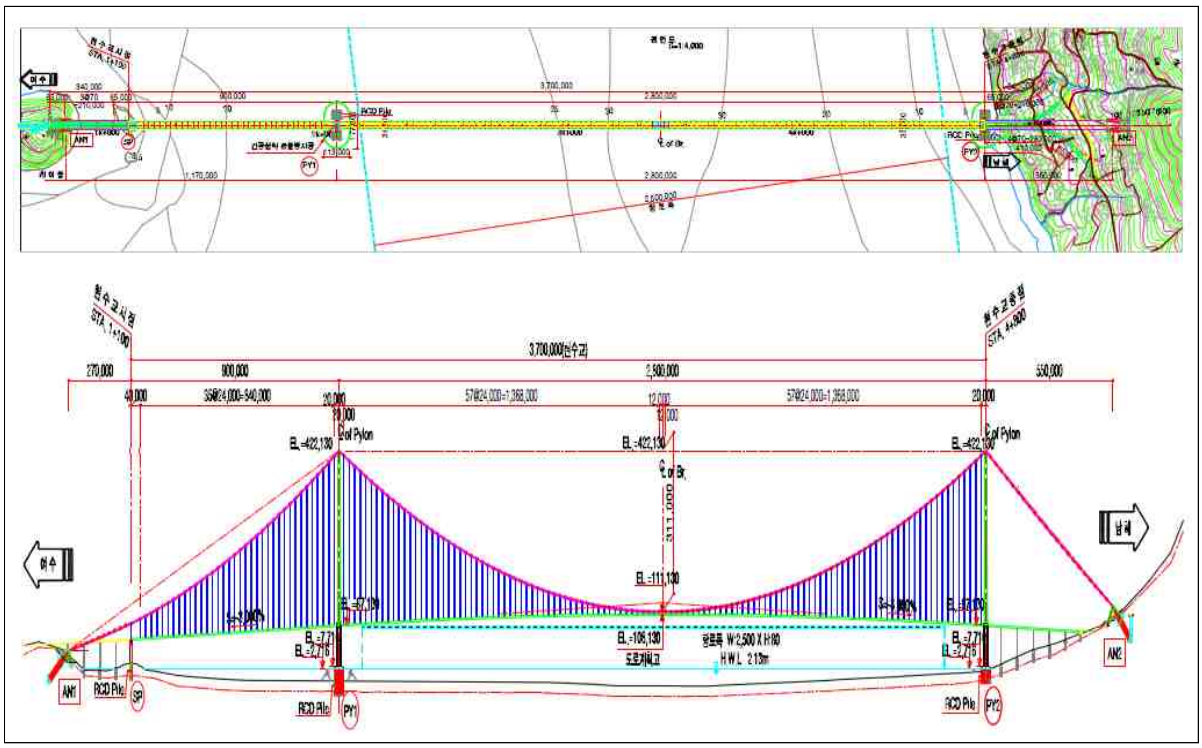


그림 3-2-1-164. 현수교 종편면도

⑦ 주탑 및 기초

㉮ 복합주탑

ⓐ 현수교는 자중 및 보강형에 작용하는 하중이 행어를 통해 주케이블로 전달되며, 다시 주탑을 통해 하부구조로 전달되는 구조를 가지고 있음.

ⓑ 따라서 주탑은 매우 큰 크기의 압축력과 휨을 받는 부재이므로 압축력에 유리한 콘크리트 주탑을 적용하는 것이 효율적임.

ⓒ그러나 현수교의 규모가 커짐에 따라 경간 길이의 증가와 함께 주탑의 높이도 매우 높아져 본 교량과 같이 400m를 상회하기도 하며, 이러한 고주탑을 콘크리트 주탑으로 계획할 경우, 주탑의 관성력이 커져 지진 시 큰 부재력이 주탑 기부에 작용할 것이 분명함.

ⓓ 따라서 큰 압축력과 휨모멘트가 작용할 것으로 생각되는 주탑 하단부는 콘크리트 주탑으로 저항하도록 하며, 나머지 부분은 강재 주탑으로 계획함.

㈏ 분리 기초판

ⓐ 주탑 기부에서 각 탑주 중심 사이의 거리는 63.5m로 두 탑주를 모두 지지하는 하나의 확대 기초판을 적용한다면, 확대기초판의 긴 변의 길이는 100m 이상이 되어 기초판에 소요되는 콘크리트량이 매우 클 것임.

ⓑ 따라서 각 탑주에 각각의 확대 기초판을 갖는 것으로 계획하고 기초판 사이를 연결하는 프리스트레싱된 타이빔(tie beam)을 설치하여 탑주 멀어지는 방향으로 작용하는 수평 인장력에 저항할 수 있도록 함으로써 기초판에 소요되는 콘크리트 물량은 줄이고, 주탑 기부에 작용하는 수평하중에 대한 안전성을 확보함.

㈐ 인공섬식 충돌방지공 현장타설말|뚝

ⓐ 성토재를 통해 선박 충돌시 발생하는 큰 에너지를 효과적으로 소산시킬 수 있고 주탑 하부의 육상공사가 가능한 안벽식 인공섬 충돌방지공을 적용함.

ⓑ 인근의 이순신대교의 지반 조사 자료를 통해 추정하였을 때, 수심이 깊고 점토층이 깊이 존재할 것으로 예상되어 현장타설말뚝(RCD)을 적용함.

또한 인공섬식 충돌방지공의 적용을 통해 말뚝의 수평저항력이 증대되는 효과를 기대할 수 있음.

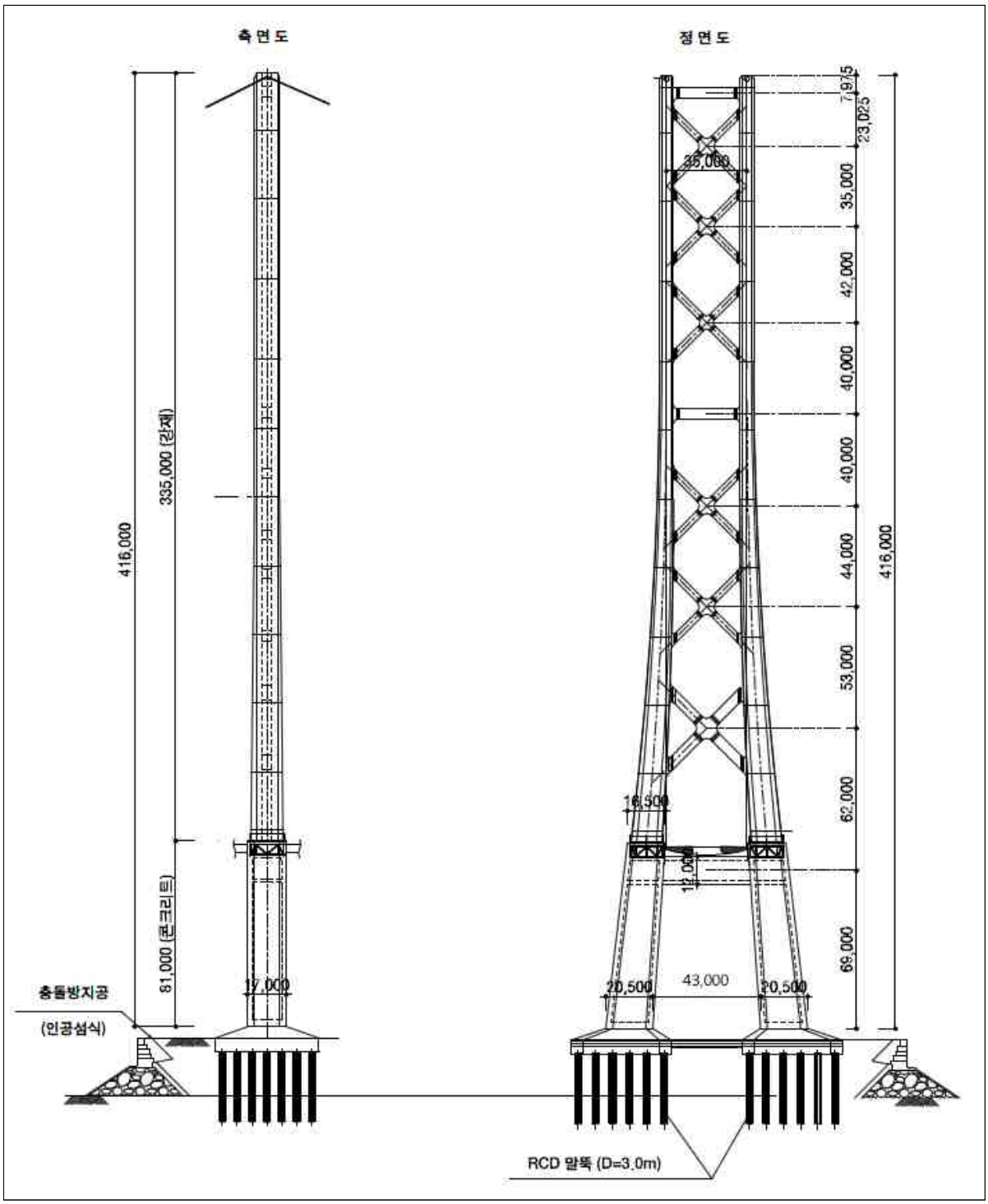


그림 3-2-1-165. 복합 주탑

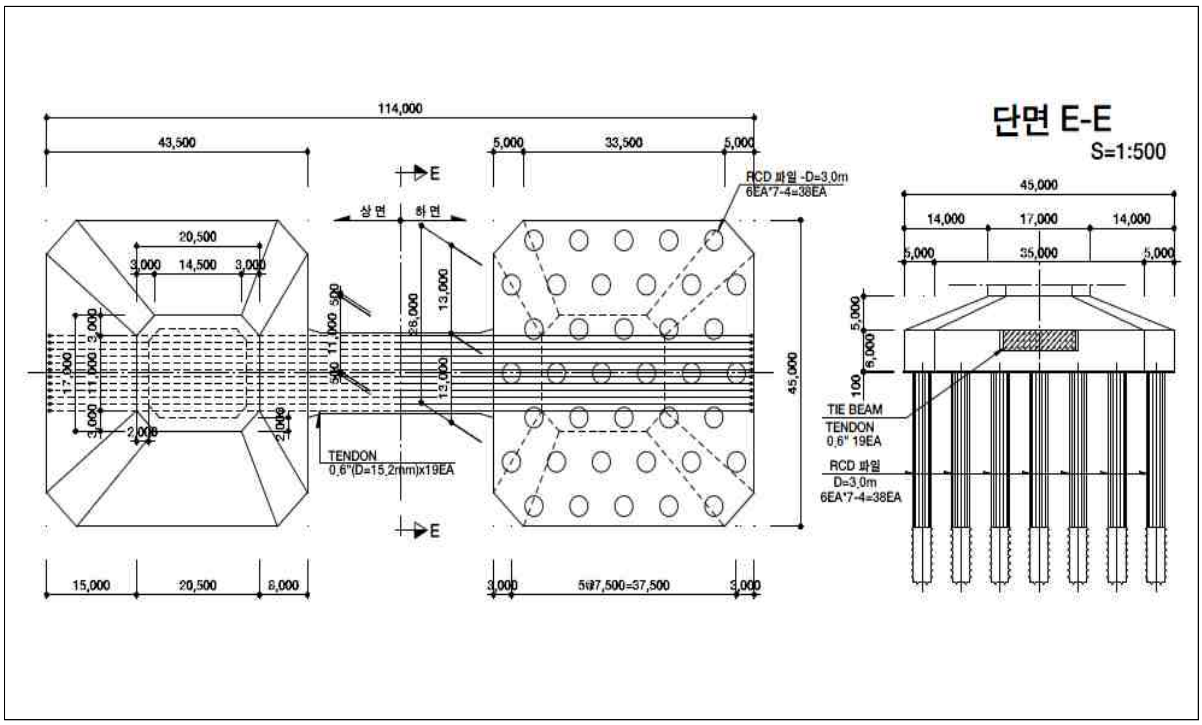


그림 3-2-1-166. 주탑 기초

⑧ 앵커리지

㉮ 지중정착식 앵커리지는 암질이 양호한 지역의 암반에 직접 케이블을 정착시키는 형식으로 암반 쐐기의 중량과 점착, 마찰저항으로 인발력에 저항함.

암반 굴착량 및 콘크리트 구체량을 최소화할 수 있으므로 가장 경제적인 앵커리지 형식이지만, 암반 상태가 불량한 경우 적용할 수 없고, 암 천공 시 직진성 확보가 어려워 목표 지점에 정확히 정착하는 것이 까다로움.

따라서 상대적으로 스트랜드의 수가 많은 PPWS 주케이블로 가설할 때 지중정착식 앵커리지를 적용할 경우 먼저 암 천공에 대한 정도 관리 방안을 수립하여야 함.

㉯ 중력식 앵커리지는 콘크리트 구체에 의한 자중과 그로 인한 마찰력으로 연직력 및 수평력에 저항하는 형식으로, 콘크리트 소요량이 많다는 단점이 있으나 지반 조건에 대한 영향이 적으므로 연약지반에 적용할 수 있을 뿐만 아니라 가장 불확실성이 적다는 장점이 있음.

㉰ 따라서 본 교량에는 주케이블을 Air Spinning 공법으로 가설하는 경우에는 지중정착식 앵커리지를, PPWS 주케이블로 가설하는 경우에는 지중정착식 앵커리지

를 적용함.

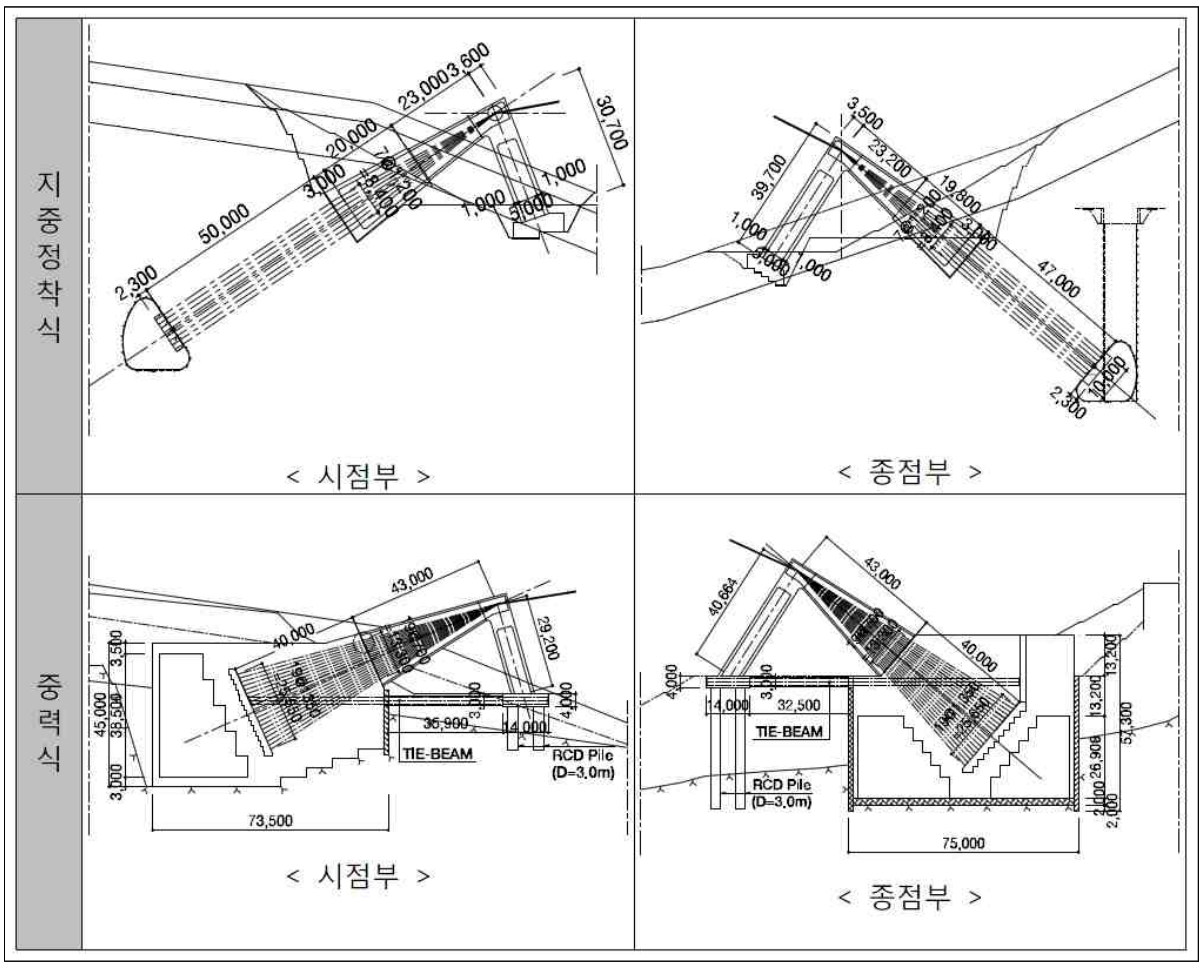


그림 3-2-1-167. 앵커리지

(2) 개발기술의 시공원가

① 공사원가 분석의 전제

ⓐ 초장대교량 건설용 콘크리트 개발기술은 전체 건설공사 중 해상기초, 주탑과 앵커리지에만 사용되는 것으로 가정하며, 기타 모든 조건은 Prototype의 설계내용을 반영함.

ⓑ 고주탑용 고압송 콘크리트 : '제3장 1. 분석대상 구조물' 중 주경간 1,200m 사장교 Prototype의 주탑공사에 적용함.

ⓒ 해상기초용 복합성능 콘크리트 : ‘제3장 1. 분석대상 구조물’ 중 주경간 1,200m 사장교 Prototype의 단부교각공사의 현장타설말뚝에 적용함.

ⓓ 앵커리지용 초저발열 콘크리트 : ‘제3장 1. 분석대상 구조물’ 중 현수교의 앵커리지공에 적용함.

ⓔ 분석대상 콘크리트 배합은 초장대교량 건설용 콘크리트 개발기술과 기존기술의 배합을 기준으로 해상기초용, 주탑용 및 앵커리지용으로 구분하여 분석하였으며, 각 콘크리트 배합은 다음과 같음.

표 3-2-1-62. 고주탑용 고압송콘크리트

구분	설계강도 (MPa)	단위중량(kg/㎥)							
		W	C	GGBF	FA	S	G[주1)]	SP	수중불분리혼화제
기존기술	40	158	248	165	0	721	959	6.5	-
개발기술	40	155	211	211	47	761	910	3.2	-

주1) 기존기술 G_{max} = 20mm, 개발기술 G_{max} = 25mm

표 3-2-1-63. 해상기초용 복합성능 콘크리트

구분	설계강도 (MPa)	단위중량(kg/㎥)							
		W	C	GGBF	FA	S	G	SP	수중불분리혼화제
기존기술	35	210	500	-	-	636	859	2.5	2.5
개발기술	35	204	275	275	-	696	833	2.5	2.0

표 3-2-1-64. 앵커리지용 초저발열 콘크리트

구분	설계강도 (MPa)	단위중량(kg/㎥)							
		W	C[주1)]	GGBF	FA	S	G	SP	수중불분리혼화제
기존기술	35	164	447	-	-	806	932	3.6	-
개발기술	35	135	226	134	87	820	937	4.0	-

주1) 저열시멘트

ⓕ 콘크리트 생산에 사용되는 재료(시멘트, 플라이애시, 슬래그미분말, 잔골재, 굵은 골재 및 화학혼화제)는 2013년 물가정보 등을 참고하여 단가를 적용함.

표 3-2-1-65. 재료 단가

구분	단위	단가(원)		적용단가 (원/kg)	비고
		Prototype	물가정보		
포틀랜드시멘트	M/T	80,960	80,960	80.96	전국단가, Bulk
강모래	㎥	10,000	12,000	7.50	왕사/중사, 12,000/1,600=7.05
쇄석자갈	㎥	20,000	15,000	9.09	25mm, 15,000/1,650=7.09
플라이애시	M/T	32,000	25,000	25.00	삼표(KS L 5405)
고로슬래그미분말	M/T	-	54,500	54.40	삼표(KS F 2563)
저열시멘트(4종)	M/T	-	94,000	94.00	쌍용양회
고성능감수제(SP)	kg	1,300	1,500	1,500.00	호스록코리아, 콘푸라스트 SP355
수중불분리혼화제	kg	8,400	8,400	8,400.00	증점제

주) 배합수는 단가는 고려하지 않음(2012년 수돗물 톤당 단가는 307원임).

ⓖ 콘크리트 물량은 산출물량에 대하여 1% 할증을 적용하였으며, 1% 할증이 적용된 값의 소수점 이하 자리에서 버림한 값을 최종 산출물량으로 하여 공사원가 분석에 적용함.

ⓗ 특히 고주탑용 고압송 콘크리트의 경우 펌프카 타설로 주탑공사의 콘크리트 타설 방법을 콘크리트 펌프카 타설로 수정하여 분석함.

ⓘ 개발된 각 기술의 원가계산은 재료비, 노무비, 경비로 구성되며, 하나의 공사로 가정하여 일반관리비, 이윤, 부가가치세 등을 포함한 금액임.
경비부문의 기계경비를 제외한 보험료 및 기타 경비 등은 2012년 공사원가제비율을 적용하여 분석함.

표 3-2-1-66. 구성 항목별 2012년 공사원가 제비율

항목	산출근거	비고
산재보험료	노무비 × 3.7%	2012년 공사원가제비율 적용
고용보험료	노무비 × 0.79%	
국민건강보험료	직접노무비 × 1.7%	
국민연금보험료	직접노무비 × 2.49%	
노인장기요양보험료	건강보험료 × 6.55%	
퇴직공제부금	직접노무비 × 2.3%	
산업안전보건관리비	(재료비+직접노무비) × 2.48%	
환경보전비	(재료비+직접노무비+기계경비) × 0.9%	
기타경비	(재료비+노무비) × 6.2%	

② 주탑공

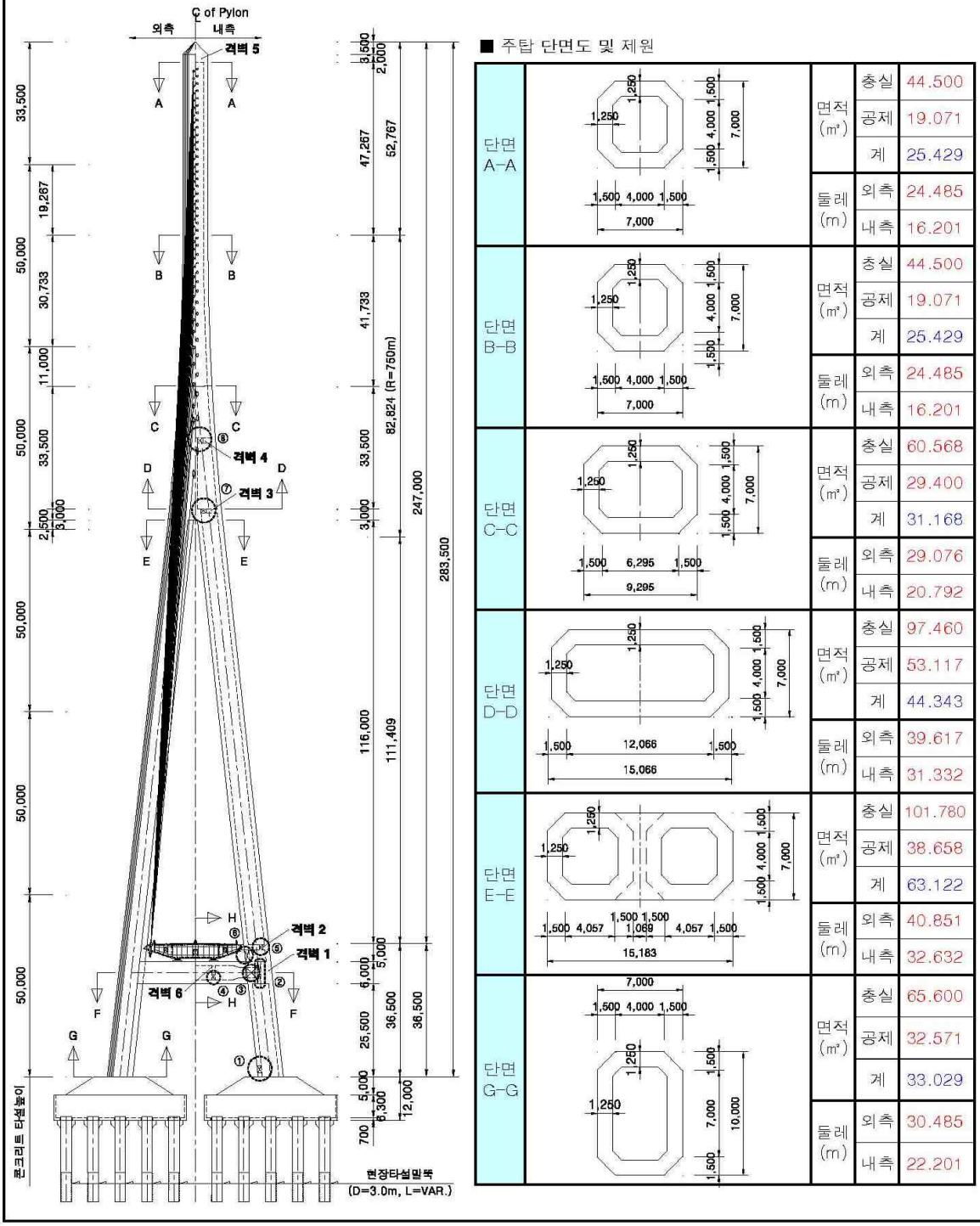
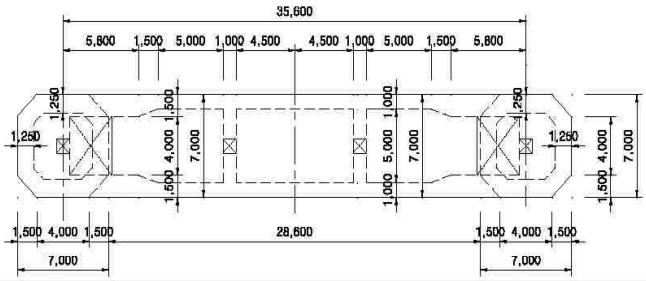


그림 3-2-1-168. 기둥(PYLON 1개당)

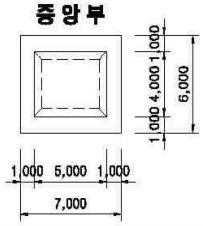
공 증	산 출 근 거	단위	수 량

■ 주탑 가로보 단면도 및 제원

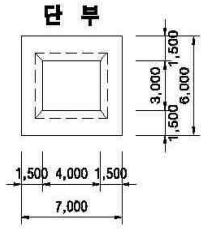
단면 F-F



단면 H-H



중앙부			단부		
면적(㎡)	총실	42.000	면적(㎡)	총실	42.000
	공제	20.000		공제	12.000
	계	22.000		계	30.000
둘레(m)	외측	26.000	둘레(m)	외측	26.000
	내측	18.000		내측	14.000



■ 격벽 콘크리트 추가량 (주탑 1 LEG 당)

위 치	면적(㎡)	두께(m)	콘크리트 추가량(㎥)	거푸집 추가량(㎡)	비고
격벽1	19.071	6.000	114.426	19.071	
격벽2	19.071	1.500	28.607	19.071	
격벽3	19.071	1.000	19.071	19.071	
격벽4	19.071	1.500	28.607	19.071	
격벽5	19.071	2.000	38.142	19.071	탑정부 제외
격벽6	20.000	1.000	20.000	20.000	

■ 개구부 콘크리트 공제량 및 거푸집 추가량 (주탑 1 LEG 당)

위 치	폭(m)	높이(m)	두께(m)	콘크리트 공제량(㎥)	거푸집 추가량(㎡)	비고
①	1.500	2.000	1.250	3.750	6.875	벽체
②	1.000	1.000	6.000	6.000	24.000	
③	5.000	4.000	3.250	65.000	42.250	벽체
④	1.000	1.500	1.000	1.500	4.000	벽체
⑤	1.000	1.000	1.500	1.500	6.000	
⑥	1.000	3.186	1.250	3.983	9.215	벽체
⑦	1.500	1.500	1.000	2.250	6.000	
⑧	1.500	1.500	1.000	2.250	6.000	

그림 3-2-1-169. 기둥(PYLON 1개당)

㉮ 탑주

ⓐ 단면 A-A ~ 단면 B-B 구간

= (25.429㎡ + 25.429㎡) ÷ 2 × 49.267m = 1,252.811㎥

ⓑ 단면 B-B ~ 단면 C-C 구간

= (25.429㎡ + 31.168㎡) ÷ 2 × 41.733m = 1,180.981㎥

ⓒ 단면 C-C ~ 단면 D-D 구간

= (31.168㎡ + 44.343㎡) ÷ 2 × 33.500m = 1,264.809㎥

ⓓ 단면 D-D ~ 단면 E-E 구간

= [(97.460㎡ + 101.780㎡) ÷ 2 - 38.658㎡] × 3.000m = 182.886㎥

ⓔ 단면 E-E ~ 주탑 가로보 하단

= (25.429㎡ + 25.429㎡) ÷ 2 × 127.000m × 2개소 = 6,458.966㎥

ⓕ 주탑 가로보 하단 ~ 단면 G-G 구간

= (25.429㎡ + 33.029㎡) ÷ 2 × 25.500m × 2개소 = 1,490.679㎥

ⓖ 탑주 합계

= ① + ② + ③ + ④ + ⑤ + ⑥ = 11,831.132㎥

ⓗ 탑주 콘크리트 물량

= ⑦ × 1.01(1% 할증) = 11,831.132㎥ × 1.01 = 11,949.443㎥

㉯ 가로보

ⓐ 가로보 = 단부 + 단부 ~ 중앙부 + 중앙부

= [30.000㎡ × 5.800m + (30.000㎡ + 22.000㎡) × 1.500m ÷ 2 + 22.000㎡ × 10.500m] × 2(양쪽) = 880.000㎥

ⓑ 가로보 콘크리트 물량

= ① × 1.01(1% 할증) = 880.000㎥ = 896.880㎥

㉰ 추가 콘크리트

ⓐ 탑정부

= (0.000㎡ + 44.500㎡) ÷ 2 × 3.500m = 77.875㎥

ⓑ 격벽부(격벽 1~6) = (격벽 1~4, 6) × 2개소 + 격벽 5 × 1개소

= [격벽 1 + 격벽 2 + 격벽 3 + 격벽 4 + 격벽 6] × 2개소 + 격벽 5

= (19.071㎡ × 6.000m + 19.071㎡ × 1.500m + 19.071㎡ × 1.000m + 19.071㎡ × 1.500m + 20.000㎡ × 1.000m) × 2개소 + 19.071㎡ × 2.000m = 459.562㎥

ⓒ 추가 콘크리트 합계

= ① + ② = 77.875㎥ + 459.562㎥ = 537.437㎥

ⓓ 추가 콘크리트 물량

= ③ × 1.01(1% 할증) = 537.437㎥ × 1.01 = 542.811㎥공제 콘크리트

㉮ 공제 콘크리트

ⓐ 개구부 1

= 폭 × 높이 × 두께 × 2개소 = 1.500m × 2.000m × 1.250m × 2개소 = 7.500㎥

ⓑ 개구부 2

= 폭 × 높이 × 두께 × 2개소 = 1.000m × 1.000m × 6.000m × 2개소 = 12.000㎥

ⓒ 개구부 3

= 폭 × 높이 × 두께 × 2개소 = 5.000m × 4.000m × 3.250m × 2개소 = 130.000㎥

ⓓ 개구부 4

= 폭 × 높이 × 두께 × 2개소 = 1.000m × 1.500m × 1.000m × 2개소 = 3.000㎥

ⓔ 개구부 5

= 폭 × 높이 × 두께 × 2개소 = 1.000m × 1.000m × 1.500m × 2개소 = 3.000㎥

ⓕ 개구부 6

= 폭 × 높이 × 두께 × 2개소 = 1.000m × 3.186m × 1.250m × 2개소 = 7.965㎥

ⓖ 개구부 7

= 폭 × 높이 × 두께 × 2개소 = 1.500m × 1.500m × 1.000m × 2개소 = 4.500㎥

ⓗ 개구부 8

= 폭 × 높이 × 두께 × 2개소 = 1.500m × 1.500m × 1.000m × 2개소 = 4.500㎥

ⓘ 개구부 합계

= ① + ② + ③ + ④ + ⑤ + ⑥ + ⑦ + ⑧

= 7.500㎥ + 12.000㎥ + 130.000㎥ + 3.000㎥ + 3.000㎥ + 7.965㎥ + 4.500㎥ + 4.500㎥ = 172.465㎥

ⓙ 공제 콘크리트 물량

= ⑨ × 1.01(1% 할증) = 172.465㎥ × 1.01 = 174.189㎥

③ 파일캡(PYLON 1개당)

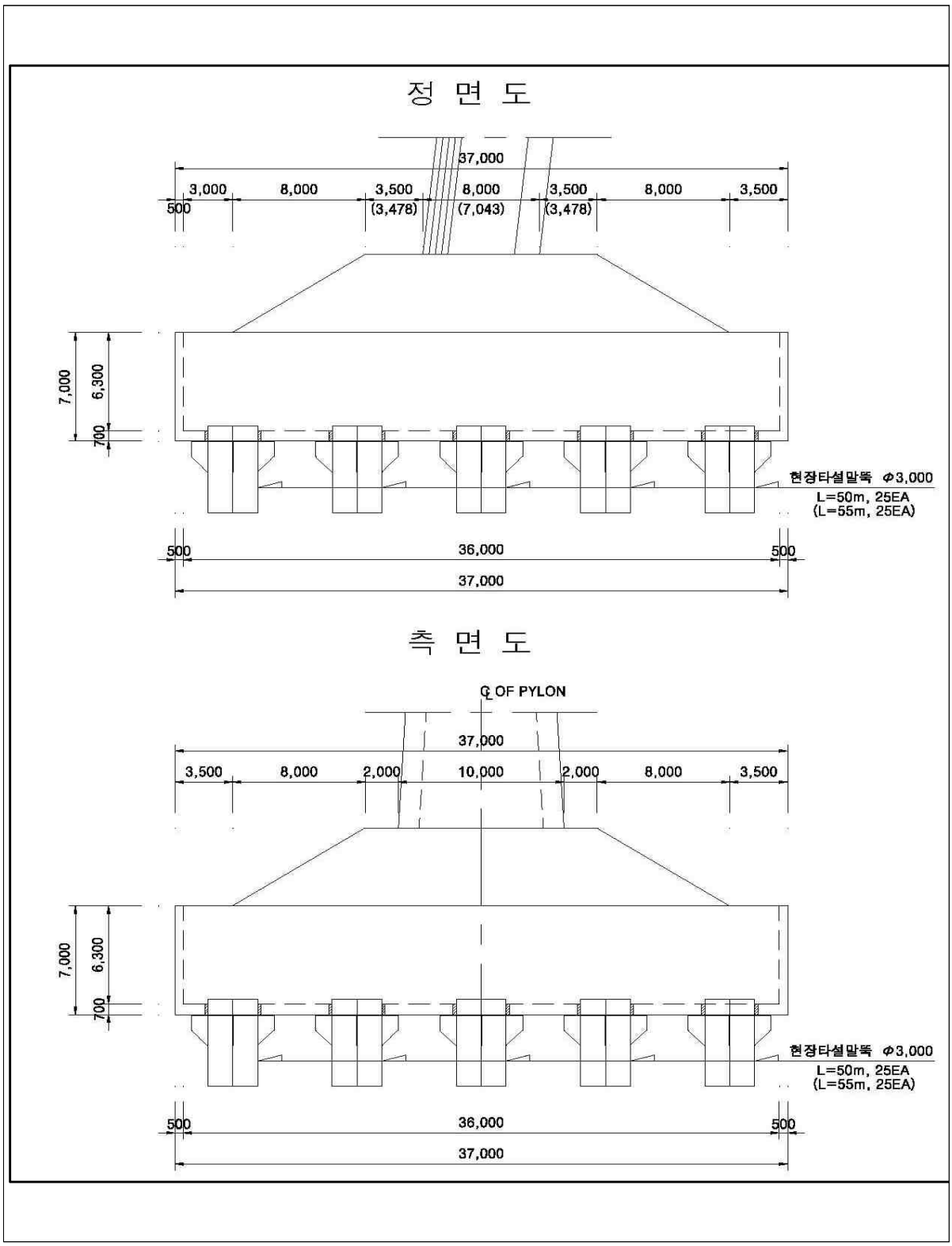


그림 3-2-1-170. 파일캡(PYLON 1개당)

㉮ Footing

ⓐ ① Footing 콘크리트 = (가로 × 세로 × 높이 - 말뚝면적 × 높이 × 파일 개수) × 2개소

= (36.000m × 36.000m × 6.300m - $\pi \times 1.522^2$㎡ × 0.500m × 25EA) × 2개소

= 16,147.664㎥

ⓑ Footing 콘크리트 물량

= ① × 1.01(1% 할증) = 16,147.664㎥ × 1.01 = 16,309.140㎥

㉯ Fedestal

ⓐ ① Fedestal 콘크리트 = (윗 면적 + 밑 면적) ÷ 2 × 높이 × 2개소

= (14.000m × 14.000m + 30.000m × 30.000m) ÷ 2 × 5.000m × 2개소

= 5,480.000㎥

ⓑ Fedestal 콘크리트 물량

= ① × 1.01(1% 할증) = 5,480.000㎥ × 1.01 = 5,534.800㎥

④ 현장타설말뚝

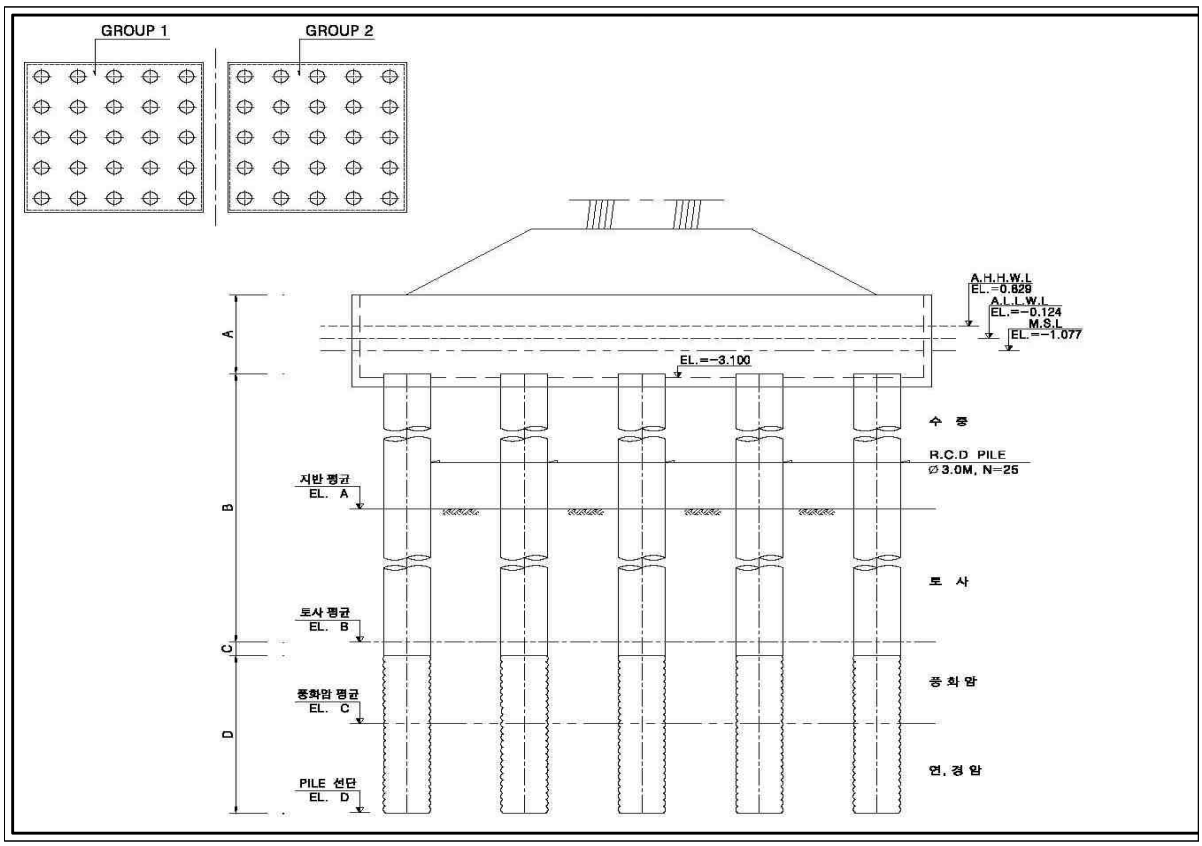


그림 3-2-1-171. 현장타설말뚝

표 3-2-1-67. 현장타설말뚝 위치별 깊이

구분	PYLON 1		PYLON 2		비고
	Group 1	Group 2	Group 1	Group 2	
가설관 상단 EL.	7.829	7.829	7.829	7.829	
Pile 상단 EL.	−2.800	−2.800	−2.800	−2.800	
EL. A	−21.960	−21.960	−26.310	−26.310	
EL. B	−36.960	−36.960	−41.310	−41.310	
EL. C	−46.960	−46.960	−51.310	−51.310	
EL. D	−53.800	−53.800	−58.800	−58.800	
A(가설관)	10.629	10.629	10.629	10.629	
B	34.160	34.160	38.510	38.510	
C(풍화암 근입깊이)	1.000	1.000	1.000	1.000	
D(R.C.D)	15.841	15.841	16.490	16.490	
RCD Pile 깊이	51.000	51.000	56.000	56.000	

㉮ PYLON 1

ⓐ ① Group 1 = 말뚝 면적 × 깊이 × 말뚝 개수

= $\pi \times 1.500^2$㎡ × 51.000m × 25EA = 9,012.444㎥

ⓑ ② Group 2 = 말뚝 면적 × 깊이 × 말뚝 개수

= $\pi \times 1.500^2$㎡ × 51.000m × 25EA = 9,012.444㎥

ⓒ ③ PYLON 1의 현장타설말뚝

= ① + ② = 9,012.444㎥ + 9,012.444㎥ = 18,024.888㎥

ⓓ PYLON 1의 현장타설말뚝 콘크리트 물량

= ③ × 1.01(1% 할증) = 18,024.888㎥ × 1.01 = 18,205.137㎥

㉯ PYLON 2

ⓐ ① Group 1 = 말뚝 면적 × 깊이 × 말뚝 개수

= $\pi \times 1.500^2$㎡ × 56.000m × 25EA = 9,896.015㎥

ⓑ ② Group 2 = 말뚝 면적 × 깊이 × 말뚝 개수

= $\pi \times 1.500^2$㎡ × 56.000m × 25EA = 9,896.015㎥

ⓒ ③ PYLON 2의 현장타설말뚝

= ① + ② = 9,896.015㎥ + 9,896.015㎥ = 19,792.030

ⓓ PYLON 2의 현장타설말뚝 콘크리트 물량

= ③ × 1.01(1% 할증) = 19,792.030㎥ × 1.01 = 19,989.950㎥

⑤ PC HOUSE(PYLON 1개당)

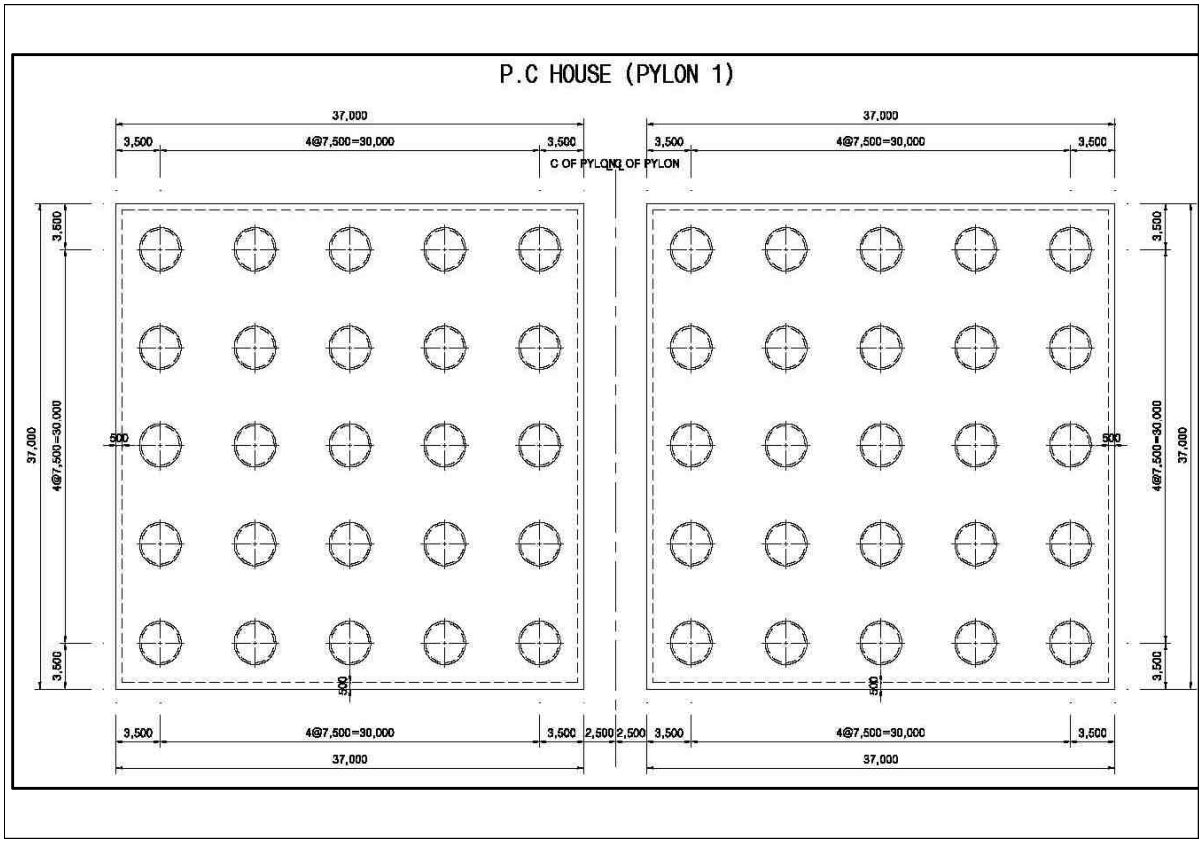


그림 3-2-1-172. PC HOUSE(PYLON 1개당)

㉮ 하부슬래브

① 하부슬래브 = (밑면적 × 높이 - 말뚝 면적 × 높이 × 말뚝 개수) × 2개소

= (36.000m × 36.000m × 0.700m - $\pi \times 1.700^2$㎡ × 0.700m × 25EA) × 2개소

= 1,496.628㎥

하부슬래브 콘크리트 물량

= ① × 1.01(1% 할증) = 1,496.628㎥ × 1.01 = 1,511.594㎥

㉯ 외측 수직벽

① 외측 수직벽 = [(외측 면적 - 내측 면적) × 높이] × 2개소

= [(37.000m × 37.000m - 36.000m × 36.000m) × 0.700m] × 2개소

= 1,022.000㎥

하부슬래브 콘크리트 물량

= ① × 1.01(1% 할증) = 1,022.000㎥ × 1.01 = 1,032.220㎥

㉰ 트레미

① 트레미

= ($\pi \times 1.700^2$㎡ - $\pi \times 1.500^2$㎡) × 0.700m × 25EA × 2개소 = 70.372㎥

트레미 콘크리트 물량

= ① × 1.01(1% 할증) = 70.372㎥ × 1.01 = 71.075㎥

⑥ 주탑공 콘크리트 물량 총괄

주탑공의 총 콘크리트 물량은 113,542.635㎥이며, 세부 공정별 콘크리트 산출물량은 다음 표와 같음.

표 3-2-1-68. 콘크리트 물량 총괄표

구분			단위	PYLON 1	PYLON 2	합계	비고
주탑공			㎥	55,878.911	57,663.724	113.542.635	
	기둥	탑주	㎥	11,949.443	11,949.443	23,898.886	
		가로보	㎥	896.880	896.880	1,793.760	
		추가 콘크리트	㎥	542.811	542.811	1,085.622	탑정 · 격벽 추가
		공제 콘크리트	㎥	-174.189	-174.189	-348.378	개구부 공제
		소계	㎥	13,214.945	13,214.945	26,429.890	
	파일캡	Footing	㎥	16,309.140	16,309.140	32,618.280	
		Fedestal	㎥	5,534.800	5,534.800	11,069.600	
		소계	㎥	21,843.940	21,843.940	43,687.881	
	현장타설말뚝		㎥	18,205.137	19,989.950	38,195.087	말뚝깊이(51m, 56m)
	PC HOUSE	하부슬래브	㎥	1,511.594	1,511.594	3,023.188	
		외측 수직벽	㎥	1,032.220	1,032.220	2,064.440	
		트레미	㎥	71.075	71.075	142.150	
		소계	㎥	2,614.889	2,614.889	5,229.778	

주) 콘크리트 물량 = 산출물량 × 1.01(1% 할증)

③ 단부교각공

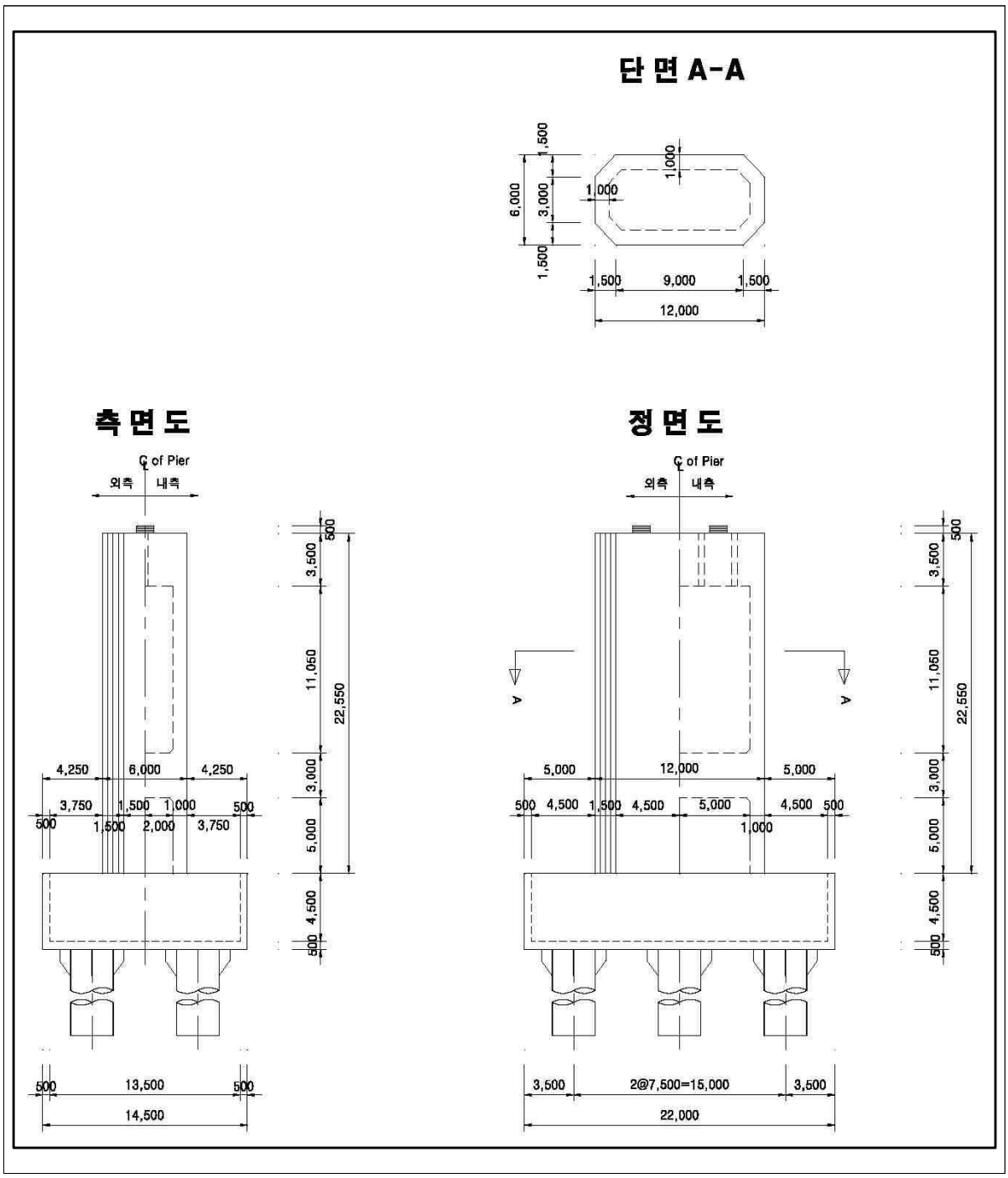


그림 3-2-1-173. 기둥

표 3-2-1-69. 교각 기둥높이 등

구분	단위	P1	P2	P3	P4	P5	P6
기둥높이	m	22.550	25.190	28.250	28.250	25.190	22.550
A-A단면 중공 높이	m	11.050	13.690	16.750	16.750	13.690	11.050

㉮ PER 1

ⓐ ① 기둥 부피 = 기둥 단면적(가로 × 세로 - 모따기 면적) × 높이

= [12.000m × 6.000m - (1.500m × 1.500m) ÷ 2 × 4개소] × 22.550m

= 1,522.125㎥

ⓑ ② 기둥 내부 중공 등 공제

= [10.000m × 4.000m - (0.914m × 0.914m) ÷ 2 × 4개소] × (5.000m + 11.050m) +

$\pi \times 0.200^2$㎡ × 3.500m × 4개소 = 616.943㎥

ⓒ PIER 1의 콘크리트 물량

= (① - ②) × 1.01(1% 할증)

= (1,522.125㎥ - 616.943㎥) × 1.01 = 905.182㎥ × 1.01 = 914.234㎥

㉯ PER 2

ⓐ ① 기둥 부피 = 기둥 단면적(가로 × 세로 - 모따기 면적) × 높이

= [12.000m × 6.000m - (1.500m × 1.500m) ÷ 2 × 4개소] × 25.190m

= 1,700.325㎥

ⓑ ② 기둥 내부 중공 등 공제

= [10.000m × 4.000m - (0.914m × 0.914m) ÷ 2 × 4개소] × (5.000m + 13.690m) +

$\pi \times 0.200^2$㎡ × 3.500m × 4개소 = 718.132㎥

ⓒ PIER 2의 콘크리트 물량

= (① - ②) × 1.01(1% 할증)

= (1,700.325㎥ - 718.132㎥) × 1.01 = 982.193㎥ × 1.01 = 992.015㎥

㉰ PER 3

ⓐ ① 기둥 부피 = 기둥 단면적(가로 × 세로 - 모따기 면적) × 높이

= [12.000m × 6.000m - (1.500m × 1.500m) ÷ 2 × 4개소] × 28.250m

= 1,906.875㎥

ⓑ ② 기둥 내부 중공 등 공제

= [10.000m × 4.000m - (0.914m × 0.914m) ÷ 2 × 4개소] × (5.000m + 16.750m) +

$\pi \times 0.200^2$㎡ × 3.500m × 4개소 = 835.420㎥

ⓒ PIER 3의 콘크리트 물량

= (① - ②) × 1.01(1% 할증)

= (1,906.875㎥ - 835.420㎥) × 1.01 = 1,071.455㎥ × 1.01 = 1,082.170㎥

㉱ PER 4

ⓐ ① 기둥 부피 = 기둥 단면적(가로 × 세로 - 모따기 면적) × 높이

= [12.000m × 6.000m - (1.500m × 1.500m) ÷ 2 × 4개소] × 28.250m

= 1,906.875㎥

ⓑ ② 기둥 내부 중공 등 공제

= [10.000m × 4.000m - (0.914m × 0.914m) ÷ 2 × 4개소] × (5.000m + 16.750m) +

$\pi \times 0.200^2$㎡ × 3.500m × 4개소 = 835.420㎥

ⓒ PIER 4의 콘크리트 물량

= (① - ②) × 1.01(1% 할증)

= (1,906.875㎥ - 835.420㎥) × 1.01 = 1,071.455㎥ × 1.01 = 1,082.170㎥

㉲ PER 5

ⓐ ① 기둥 부피 = 기둥 단면적(가로 × 세로 - 모따기 면적) × 높이

= [12.000m × 6.000m - (1.500m × 1.500m) ÷ 2 × 4개소] × 25.190m

= 1,700.325㎥

ⓑ ② 기둥 내부 중공 등 공제

= [10.000m × 4.000m - (0.914m × 0.914m) ÷ 2 × 4개소] × (5.000m + 13.690m) +

$\pi \times 0.200^2$㎡ × 3.500m × 4개소 = 718.132㎥

ⓒ PIER 5의 콘크리트 물량

= (① - ②) × 1.01(1% 할증)

= (1,700.325㎥ - 718.132㎥) × 1.01 = 982.193㎥ × 1.01 = 992.015㎥

㈅ PER 6

ⓐ ① 기둥 부피 = 기둥 단면적(가로 × 세로 - 모따기 면적) × 높이

= [12.000m × 6.000m - (1.500m × 1.500m) ÷ 2 × 4개소] × 22.550m

= 1,522.125㎥

ⓑ ② 기둥 내부 중공 등 공제

= [10.000m × 4.000m - (0.914m × 0.914m) ÷ 2 × 4개소] × (5.000m + 11.050m) +

$\pi \times 0.200^2$㎡ × 3.500m × 4개소 = 616.943㎥

ⓒ PIER 6의 콘크리트 물량

= (① - ②) × 1.01(1% 할증)

= (1,522.125㎥ - 616.943㎥) × 1.01 = 905.182㎥ × 1.01 = 914.234㎥

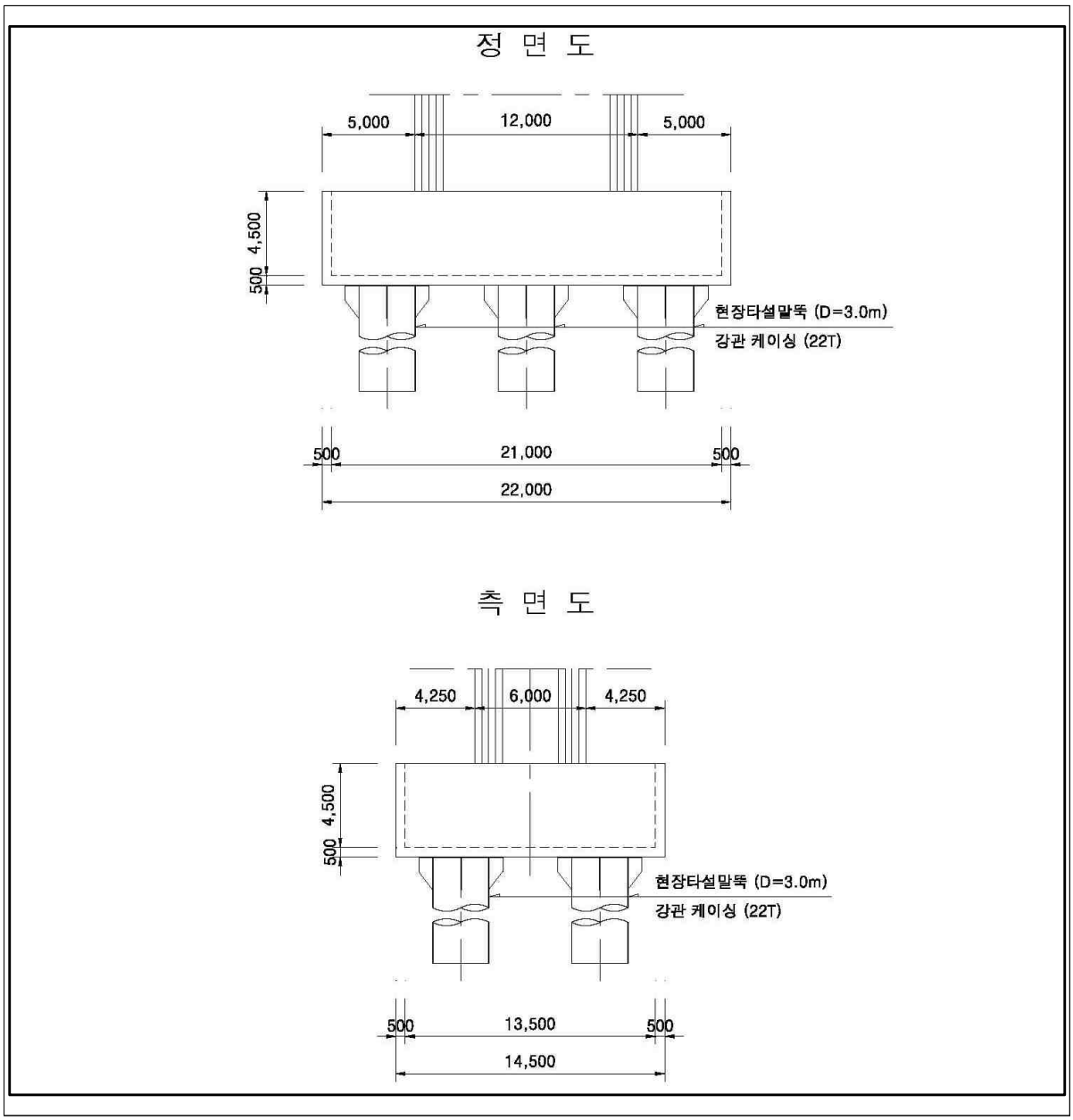


그림 3-2-1-174. 파일캡

㉮ 파일캡

ⓐ ① PIER 1 = 전체 부피 - 말뚝부피 × 말뚝 개수

= 21.000m × 13.500m × 4.500m - ($\pi \times 1.522^2$㎡ × 0.500m) × 6EA

= 1,253.918㎥

ⓑ 콘크리트 물량

= ① × 1.01(1% 할증) = 1,253.918㎥ × 1.01 = 1,266.457㎥

ⓒ PIER 1~6의 콘크리트 물량은 모두 동일

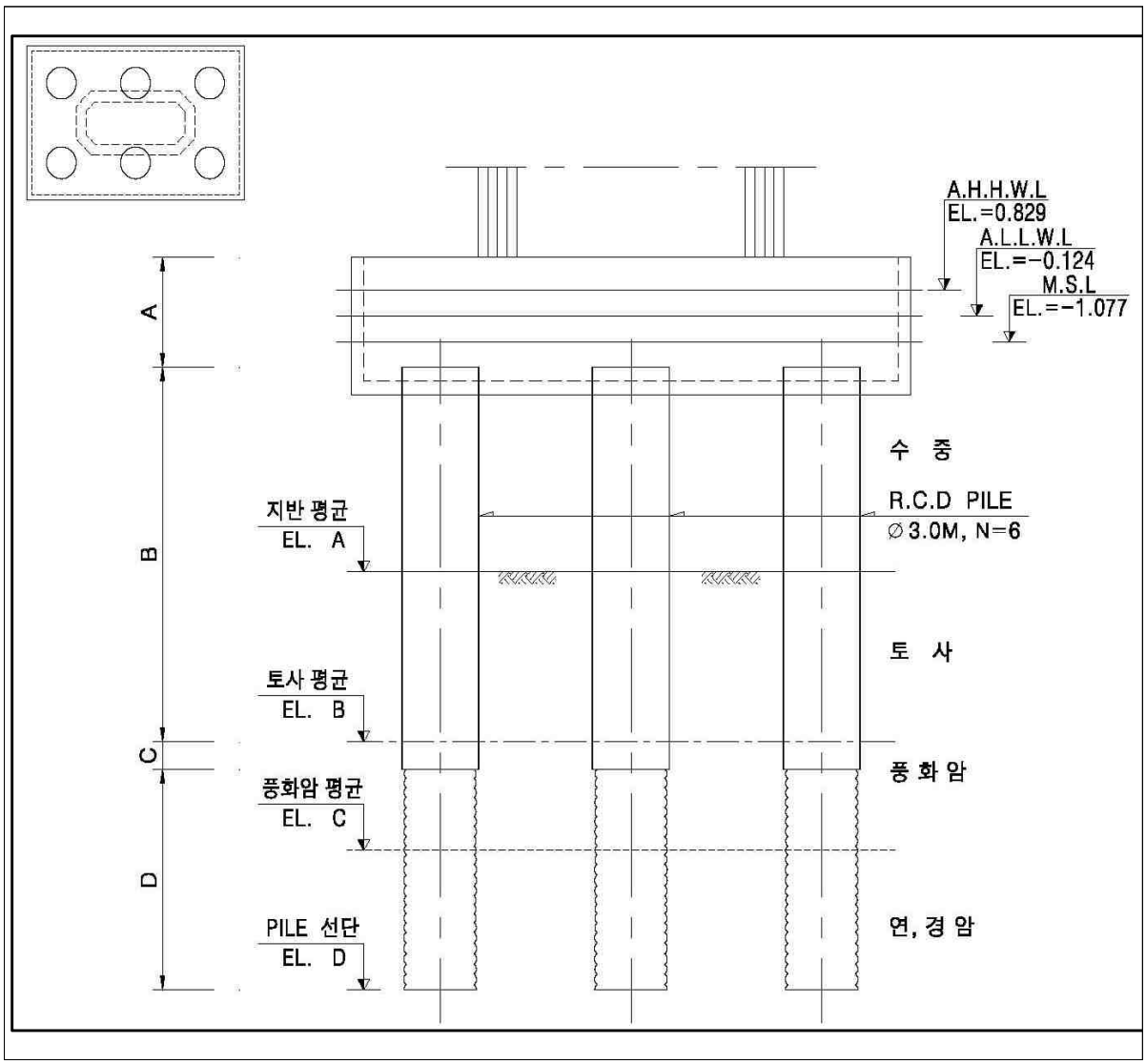


그림 3-2-1-175. 현장타설 말뚝

표 3-2-1-70. 현장타설말뚝 위치별 깊이

구분	P1	P2	P3	P4	P5	P6	비고
가설관 상단 EL.	7.829	7.829	7.829	7.829	7.829	7.829	
Pile 상단 EL.	−2.000	−2.000	−2.000	−2.000	−2.000	−2.000	
EL. A	−4.650	−6.735	−12.600	−24.390	−10.590	−7.700	
EL. B	−19.650	−21.735	−27.608	−39.390	−25.590	−22.700	
EL. C	−29.650	−31.735	−37.608	−49.390	−35.590	−32.700	
EL. D	−35.000	−37.000	−43.000	−55.000	−41.000	−40.000	
A(가설관)	9.829	9.829	9.829	9.829	9.829	9.829	
B	17.650	19.735	25.608	37.390	23.590	20.700	
C(풍화암 근입깊이)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	
D(R.C.D)	14.350	14.265	14.392	14.610	14.410	16.300	
RCD Pile 깊이	33.000	35.000	41.000	53.000	39.000	38.000	

㉮ PER 1

ⓐ ① 말뚝 부피 = 말뚝 면적 × 높이 × 말뚝 개수

= $\pi \times 1.500^2$㎡ × 32.800m × 6개소 = 1,391.097㎥

ⓑ PIER 1의 콘크리트 물량

= ① × 1.01(1% 할증) = 1,391.097㎥ × 1.01 = 1,405.008㎥

㉯ PER 2

ⓐ ① 말뚝 부피 = 말뚝 면적 × 높이 × 말뚝 개수

= $\pi \times 1.500^2$㎡ × 34.800m × 6개소 = 1,475.920㎥

ⓑ PIER 2의 콘크리트 물량

= ① × 1.01(1% 할증) = 1,475.920㎥ × 1.01 = 1,490.679㎥

㉰ PER 3

ⓐ ① 말뚝 부피 = 말뚝 면적 × 높이 × 말뚝 개수

= $\pi \times 1.500^2$㎡ × 40.800m × 6개소 = 1,730.389㎥

ⓑ PIER 3의 콘크리트 물량

= ① × 1.01(1% 할증) = 1,730.389㎥ × 1.01 = 1,747.693㎥

㉱ PER 4

ⓐ ① 말뚝 부피 = 말뚝 면적 × 높이 × 말뚝 개수

= $\pi \times 1.500^2$㎡ × 52.800m × 6개소 = 2,239.327㎥

ⓑ PIER 4의 콘크리트 물량

= ① × 1.01(1% 할증) = 2,239.327㎥ × 1.01 = 2,261.720㎥

㉮ PER 5

ⓐ ① 말뚝 부피 = 말뚝 면적 × 높이 × 말뚝 개수

= $\pi \times 1.500^2$㎡ × 38.800m × 6개소 = 1,645.566㎥

ⓑ PIER 5의 콘크리트 물량

= ① × 1.01(1% 할증) = 1,645.566㎥ × 1.01 = 1,662.022㎥

㉯ PER 6

ⓐ ① 말뚝 부피 = 말뚝 면적 × 높이 × 말뚝 개수

= $\pi \times 1.500^2$㎡ × 37.800m × 6개소 = 1,603.155㎥

ⓑ PIER 6의 콘크리트 물량

= ① × 1.01(1% 할증) = 1,603.155㎥ × 1.01 = 1,619.187㎥

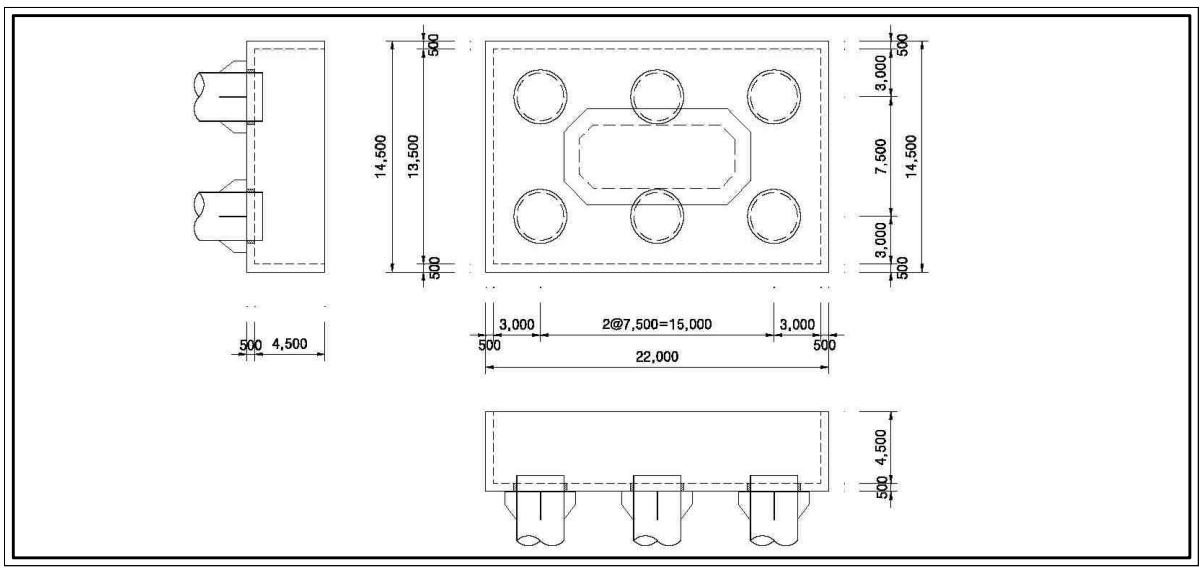


그림 3-2-1-176. PC HOUSE(PIER 1개당)

㉮ 하부슬래브

ⓐ ① 하부슬래브 = (밑면적 × 높이 - 말뚝 면적 × 높이 × 말뚝 개수)

= (21.000m × 13.500m × 0.500m - $\pi \times 1.700^2$㎡ × 0.500m × 6EA)

= 114.512㎥

ⓑ 하부슬래브 콘크리트 물량

= ① × 1.01(1% 할증) = 114.512㎥ × 1.01 = 115.657㎥

㉯ 외측 수직벽

ⓐ ① 외측 수직벽 = [(외측 면적 - 내측 면적) × 높이] × 2개소

= [(22.000m × 14.500m - 21.000m × 13.500m) × 0.500m] × 2개소

= 177.500㎥

ⓑ 하부슬래브 콘크리트 물량

= ① × 1.01(1% 할증) = 177.500㎥ × 1.01 = 179.275㎥

㉰ 트레미

ⓐ ① 트레미

= ($\pi \times 1.700^2$㎡ - $\pi \times 1.500^2$㎡) × 0.500m × 6EA = 6.032㎥

ⓑ 트레미 콘크리트 물량

= ① × 1.01(1% 할증) = 6.032㎥ × 1.01 = 6.092㎥

㉱ 단부교각공 콘크리트 물량 총괄

ⓐ 단부교각공의 총 콘크리트 물량은 113,542.635㎥임.

표 3-2-1-71. 단부교각공 콘크리트 물량 총괄표

구분	단위	P1	P2	P3	P4	P5	P6	합계
단부교각공	㎥	3,886.723	4,050.175	4,397.344	4,911.371	4,221.518	4,100.902	25,568.033
기둥	㎥	914.234	992.015	1,082.170	1,082.170	992.015	914.234	5,976.838
파일캡	㎥	1,266.457	1,266.457	1,266.457	1,266.457	1,266.457	1,266.457	7,598.742
현장타설말뚝	㎥	1,405.008	1,490.679	1,747.693	2,261.720	1,662.022	1,619.187	10,186.309
PC HOUSE	㎥	301.024	301.024	301.024	301.024	301.024	301.024	1,806.144
하부슬래브	㎥	115.657	115.657	115.657	115.657	115.657	115.657	693.942
외측 수직벽	㎥	179.275	179.275	179.275	179.275	179.275	179.275	1,075.650
트레미	㎥	6.092	6.092	6.092	6.092	6.092	6.092	36.552

④ 앵커리지공

ⓐ 현수교의 앵커리지공의 콘크리트 물량은 설계내역서 및 도면 자료의 미비로 발

주처에서 제공한 물량에 1% 할증한 값을 사용함.

표 3-2-1-72. 현수교 콘크리트 물량 총괄표

구분	단위	시점부	종점부	합계	비고
PY1 & PY2	㎥	68,121.000	43,302.000	111,423.000	주탑
기초 및 주탑본체	㎥	30,516.000	30,516.000	61,032.000	
현장타설말뚝	㎥	37,605.000	12,786.000	50,391.000	
SP1	㎥	8,485.000	-	8,485.000	
기초 및 주탑본체	㎥	5,668.000	-	5,668.000	
현장타설말뚝	㎥	2,827.000	-	2,827.000	
AN1 & AN2	㎥	8,135.550	8,135.550	16,271.100	앵커리지, 1% 할증
총합계	㎥	84,741.550	51,437.550	136,179.100	

⑤ 분석결과

㉮ 콘크리트 1m3 당 생산원가

ⓐ 기존기술 대비 초장대교량 건설용 콘크리트의 개발기술별 콘크리트 1㎥당 생산원가 저감률은 고주탑용, 해상기초용 및 앵커리지용 콘크리트가 각각 12.77%, 11.41% 및 26.53%로 분석됨.

- 고주탑용 콘크리트 : 기존기술 52,929 → 개발기술 48,515, 저감률 8.34%
- 해상기초용 콘크리트 : 기존기술 77,808 → 개발기술 70,566, 저감률 9.31%
- 앵커리지용 콘크리트 : 기존기술 56,106 → 개발기술 48,429 저감률 13.68%

표 3-2-1-73. 콘크리트 1㎥당 생산원가 비교

구분	콘크리트 1㎥당 생산원가(원/㎥)		기존기술 대비 저감률(%)	비고
	기존기술	개발기술		
고주탑용 콘크리트	52,929	48,515	8.34	
해상기초용 콘크리트	77,808	70,566	9.31	
앵커리지용 콘크리트	56,106	48,429	13.68	

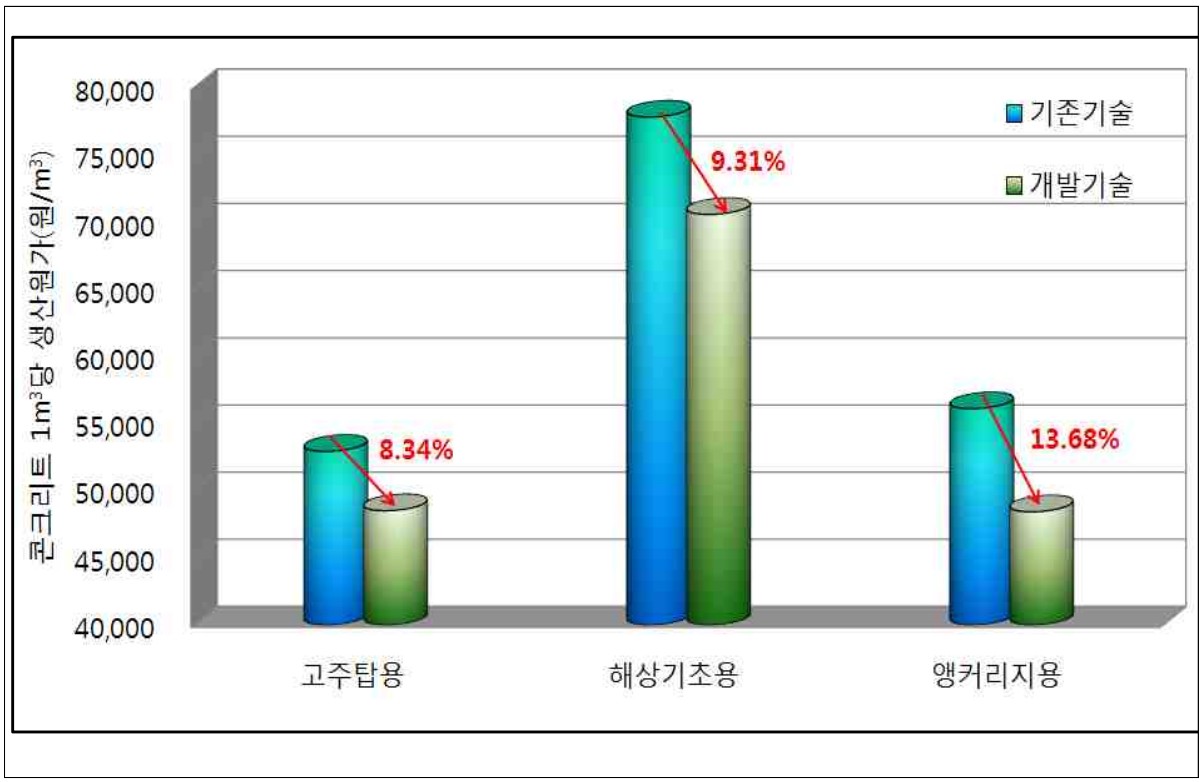


그림 3-2-1-177. 콘크리트 1㎥당 생산원가 비교

㉰ 개발기술별 콘크리트의 공시원가

ⓐ 개발기술별 콘크리트공의 공사원가는 콘크리트의 생산과 타설 공정의 공사비를 기준으로 분석함.

ⓑ 주탑공사는 ① 강관말뚝공사, ② 현장타설말뚝공사, ③ 구체공사, ④ 코핑공사, ⑤ PC 강연선 설치 및 긴장, ⑥ PC HOUSE 공사 등으로 구분되며, 고주탑용 고압송 콘크리트 개발기술의 공사원가는 ② 현장타설말뚝공사와 ④ 코핑공사 중 콘크리트의 생산과 타설로만 한정하여 분석함.

ⓒ 단부교각공사는 ① 강관말뚝공사, ② 현장타설말뚝공사, ③ 구체공사, ④ 코핑공사 및 ⑤ PC HOUSE 공사 등으로 구분되며, 해상기초용 복합성능 콘크리트 개발기술의 공사원가는 ② 현장타설말뚝공사 중 콘크리트의 생산과 타설로만 한정하여 분석함.

ⓓ 앵커리지공사는 ① 가물막이공, ② 토공, ③ 수직구 및 챔버, ④ 거푸집 및 동바리, ④ 철근 자재 및 가공, ⑤ 콘크리트공, ⑥ 앵커부천공, ⑦ PT 정착공 및 ⑧ 도

로공으로 구분되며, 앵커리지용 초저발열 콘크리트 개발기술의 공사원가는 이중 ⑤ 콘크리트공사 중 콘크리트의 생산과 타설로만 한정하여 분석함.

표 3-2-1-74. 고주탑용 고압송 콘크리트 개발기술의 공시원가

비목			금액(원)			비율(%)
			기존공법	개발기술	증감	
순공사원가	재료비	직접재료비	4,539,274,127	4,164,396,871	-374,877,256	-8.26
		간접재료비				
		소계	4,539,274,127	4,164,396,871	-374,877,256	-8.26
	노무비	직접노무비	2,734,457,411	2,630,145,000	-104,312,411	-3.81
		간접노무비	289,852,485	278,795,370	-11,057,115	-3.81
	경비	소계	3,024,309,896	2,908,940,370	-115,369,526	-3.81
		기계경비	1,185,930,211	1,197,668,063	11,737,852	0.99
		산재보험료	111,899,466	107,630,793	-4,268,673	-3.81
		고용보험료	23,892,048	22,980,628	-911,420	-3.81
		국민건강보험료	46,485,775	44,712,465	-1,773,310	-3.81
		국민연금보험료	68,087,989	65,490,610	-2,597,379	-3.81
		노인장기요양보험료	3,044,818	2,928,666	-116,152	-3.81
		퇴직공제부금	62,892,520	60,493,335	-2,399,185	-3.81
		산업안전보건관리비	180,388,542	168,504,638	-11,883,904	-6.59
		환경보전비	76,136,955	71,929,889	-4,207,066	-5.53
		기타경비	468,942,209	438,546,908	-30,395,301	-6.48
		소계	2,227,700,533	2,180,885,995	-46,814,538	-2.10
계			9,791,284,556	9,254,223,236	-537,061,320	-5.49
일반관리비			587,477,073	555,253,394	-32,223,679	-5.49
이윤			875,923,125	846,761,963	-29,161,162	-3.33
공급가액			11,254,684,754	10,656,238,593	-598,446,161	-5.32
부가가치세			1,125,468,475	1,065,623,859	-59,844,616	-5.32
총공사비			12,380,153,229	11,721,862,452	-658,290,777	-5.32

표 3-2-1-75. 해상기초용 복합성능 콘크리트 개발기술의 공시원가

비목			금액(원)			비율(%)
			기존공법	개발기술	증감	
순공사원가	재료비	직접재료비	801,119,617	723,164,070	-77,955,547	-9.73
		간접재료비				
		소계	801,119,617	723,164,070	-77,955,547	-9.73
	노무비	직접노무비	366,461,004	353,443,448	-13,017,556	-3.55
		간접노무비	38,844,866	37,465,005	-1,379,861	-3.55
	경비	소계	405,305,870	390,908,453	-14,397,417	-3.55
		기계경비	213,125,026	214,412,715	1,287,689	0.60
		산재보험료	14,996,317	14,463,612	-532,705	-3.55
		고용보험료	3,201,916	3,088,176	-113,740	-3.55
		국민건강보험료	6,229,837	6,008,538	-221,299	-3.55
		국민연금보험료	9,124,878	8,800,741	-324,137	-3.55
		노인장기요양보험료	408,054	393,559	-14,495	-3.55
		퇴직공제부금	8,428,603	8,129,199	-299,404	-3.55
		산업안전보건관리비	28,955,999	26,699,866	-2,256,133	-7.79
		환경보전비	12,426,350	11,619,182	-807,168	-6.50
		기타경비	74,798,380	69,072,496	-5,725,884	-7.66
		소계	371,695,360	362,688,084	-9,007,276	-2.42
계			1,578,120,847	1,476,760,607	-101,360,240	-6.42
일반관리비			94,687,250	88,605,636	-6,081,614	-6.42
이윤			130,753,272	126,330,325	-4,422,947	-3.38
공급가액			1,803,561,369	1,691,696,568	-111,864,801	-6.20
부가가치세			180,356,136	169,169,656	-11,186,480	-6.20
총공사비			1,983,917,505	1,860,866,224	-123,051,281	-6.20

표 3-2-1-76. 앵커리지용 초저발열 콘크리트 개발기술의 공시원가

비목			금액(원)			비율(%)
			기존공법	개발기술	증감	
순공사원가	재료비	직접재료비	980,951,640	858,507,402	−122,444,238	−12.48
		간접재료비				
		소계	980,951,640	858,507,402	−122,444,238	−12.48
	노무비	직접노무비	250,849,138	251,276,898	427,760	0.17
		간접노무비	26,590,008	26,635,351	45,343	0.17
	경비	소계	277,439,146	277,912,249	473,103	0.17
		기계경비	154,498,876	154,793,440	294,564	0.19
		산재보험료	10,265,248	10,282,753	17,505	0.17
		고용보험료	2,191,769	2,195,506	3,737	0.17
		국민건강보험료	4,264,435	4,271,707	7,272	0.17
		국민연금보험료	6,246,143	6,256,794	10,651	0.17
		노인장기요양보험료	279,320	279,796	476	0.17
		퇴직공제부금	5,769,530	5,779,368	9,838	0.17
		산업안전보건관리비	30,548,659	27,522,650	−3,026,009	−9.91
		환경보전비	12,476,696	11,381,199	−1,095,497	−8.78
		기타경비	78,020,228	70,458,018	−7,562,210	−9.69
		소계	304,560,904	293,221,231	−11,339,673	−3.72
계			1,562,951,690	1,429,640,882	−133,310,808	−8.53
일반관리비			93,777,101	85,778,452	−7,998,649	−8.53
이윤			101,366,572	98,536,789	−2,829,783	−2.79
공급가액			1,758,095,363	1,613,956,123	−144,139,240	−8.20
부가가치세			175,809,536	161,395,612	−14,413,924	−8.20
총공사비			1,933,904,899	1,775,351,735	−158,553,164	−8.20

ⓐ 초장대교량 건설용 콘크리트 개발기술을 사장교 및 현수교 Prototype에 적용하여 공사원가를 분석한 결과 개발기술별 콘크리트 1㎥ 생산 및 타설 공사원가는 다음과 같음.

표 3-2-1-77. 개발기술별 콘크리트의 공시원가

기술명	순공사원가(원/㎥)			총공사원가(원/㎥)		
	기존기술	개발기술	절감률(%)	기존기술	개발기술	절감률(%)
주탑공사 (고주탑용 + 해상기초용 콘크리트 기술)	153,027	144,633	5.49	193,488	183,200	5.32
단부교각공사 (해상기초용 복합성능 콘크리트 기술)	156,482	146,431	6.42	196,720	184,518	6.20
앵커리지공사 (앵커리지용 초저발열 콘크리트 기술)	97,017	88,742	8.53	120,044	110,202	8.20

주)고주탑용 고압송 콘크리트 기술은 기초는 해상기초용 복합성능 콘크리트 기술과 상부공인 주탑은 고주탑용 고압송 콘크리트 기술을 적용한 수치임.

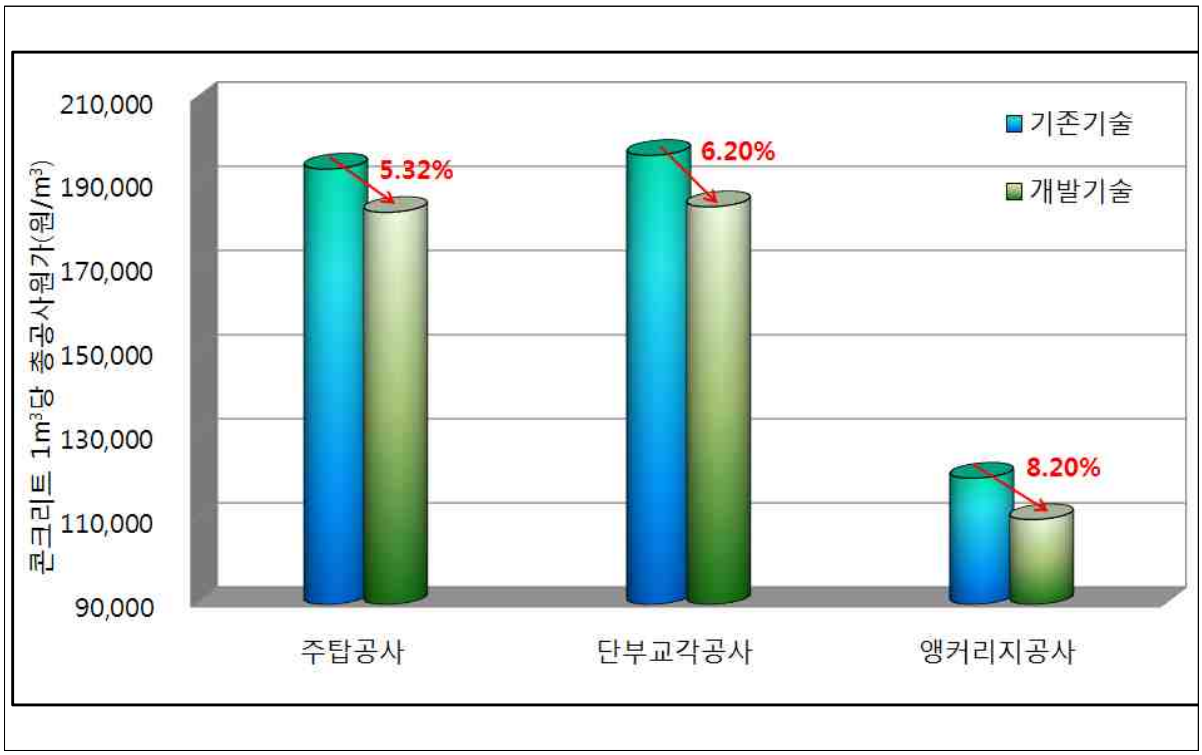


그림 3-2-1-178. 콘크리트 1㎥당 생산원가 비교

㉰ 내역서

ⓐ 주탑공사(고주탑용 고압송 콘크리트 개발기술)

품 명	규 격	단위	수량	재 료 비		노 무 비		산출경비		합 계	
				단가	금액	단가	금액	단가	금액	단가	금액
❒ 기존기술											
1)현장타설말뚝공사											
콘크리트 생산	f_{ck}=350	㎥	38,195	76,554	2,923,982,703	15,871	606,203,730	15,045	574,651,318	107,471	4,104,837,751
콘크리트 타설	B/P선	㎥	37,816	2,116	80,018,656	20,307	767,929,512	5,937	224,513,592	28,360	1,072,461,760
2)주탑(기둥&코핑)											
콘크리트 생산	f_{ck}=400	㎥	26,429	58,020	1,533,414,840	14,188	374,968,129	14,580	385,326,061	86,788	2,293,709,030
콘크리트 타설	B/P선	㎥	26,168	71	1,857,928	37,655	985,356,040	55	1,439,240	37,781	988,653,208
❒ 개발기술											
1)현장타설말뚝공사											
콘크리트 생산	f_{ck}=350	㎥	38,195	68,901	2,631,668,538	14,593	557,391,093	15,172	579,479,834	98,666	3,768,539,465
콘크리트 타설	B/P선	㎥	37,816	2,116	80,018,656	20,307	767,929,512	5,937	224,513,592	28,360	1,072,461,760
2)주탑(기둥&코핑)											
콘크리트 생산	f_{ck}=400	㎥	26,429	54,896	1,450,851,749	13,863	366,387,579	14,841	392,235,397	83,600	2,209,474,725
콘크리트 타설	펌프카	㎥	26,168	71	1,857,928	35,862	938,436,816	55	1,439,240	35,988	941,733,984

ⓑ 단부교각공사(해상기초용 복합성능 콘크리트 개발기술)

품 명	규 격	단위	수량	재 료 비		노 무 비		산출경비		합 계	
				단가	금액	단가	금액	단가	금액	단가	금액
❒ 기존기술											
1)현장타설말뚝공사											
콘크리트 생산	f_{ck}=350	㎥	10,186	76,554	779,779,757	15,871	161,664,909	15,045	153,250,381	107,471	1,094,695,047
콘크리트 타설	B/P선	㎥	10,085	2,116	21,339,860	20,307	204,796,095	5,937	59,874,645	28,360	286,010,600
❒ 개발기술											
1)현장타설말뚝공사											
콘크리트 생산	f_{ck}=350	㎥	10,186	68,901	701,824,210	14,593	148,647,353	15,172	154,538,070	98,666	1,005,009,633
콘크리트 타설	B/P선	㎥	10,085	2,116	21,339,860	20,307	204,796,095	5,937	59,874,645	28,360	286,010,600

ⓒ 앵커리지 공사(앵커리지용 초저발열 콘크리트 개발기술)

품 명	규 격	단위	수량	재 료 비		노 무 비		산출경비		합 계	
				단가	금액	단가	금액	단가	금액	단가	금액
❒ 기존기술											
1) 앵커리지공(AN1)											
콘크리트 생산	f_{ck}=350	㎥	8,135	58,910	479,231,040	3,779	30,746,099	5,330	43,362,053	68,020	555,339,194
콘크리트 타설	B/P선	㎥	8,055	1,396	11,244,780	11,754	94,678,470	4,207	33,887,385	17,357	139,810,635
2) 앵커리지공(AN2)											
콘크리트 생산	f_{ck}=350	㎥	8,135	58,910	479,231,040	3,779	30,746,099	5,330	43,362,053	68,020	555,339,194
콘크리트 타설	B/P선	㎥	8,055	1,396	11,244,780	11,754	94,678,470	4,207	33,887,385	17,357	139,810,635
❒ 개발기술											
1) 앵커리지공(AN1)											
콘크리트 생산	f_{ck}=350	㎥	8,135	51,384	418,008,921	3,806	30,959,979	5,348	43,509,335	60,538	492,478,237
콘크리트 타설	B/P선	㎥	8,055	1,396	11,244,780	11,754	94,678,470	4,207	33,887,385	17,357	139,810,635
2) 앵커리지공(AN2)											
콘크리트 생산	f_{ck}=350	㎥	8,135	51,384	418,008,921	3,806	30,959,979	5,348	43,509,335	60,538	492,478,237
콘크리트 타설	B/P선	㎥	8,055	1,396	11,244,780	11,754	94,678,470	4,207	33,887,385	17,357	139,810,635

(3) 콘크리트 생산에 의한 CO2 배출량 분석

① 분석의 개요

㉮ 분석의 배경 및 목적

ⓐ 우리나라의 CO_2 배출량은 2007년 기준 세계 9위, 1인당 CO_2 배출량은 1990년에 비해 113%나 증가해 경제협력개발기구(OECD) 국가 가운데 CO_2 배출 증가량이 세계 1위라는 것을 고려할 때 향후 우리나라도 CO_2 저감을 위한 구체적이고 적극적인 환경정책이 필요함.

ⓑ 특히 건설산업의 주요 자재인 콘크리트는 시멘트, 골재, 혼화재료 등의 자재 생산과정에서부터 제조에 이르기까지 다량의 CO_2를 배출함.

ⓒ 이에 기존기술 대비 초장대교량 건설용 콘크리트 개발기술의 CO2 배출량 저감 정도를 분석하고자 함.

㉯ 도로 시설물의 탄소배출량 산정

ⓐ 탄소배출량 산정 절차

㉠ 도로 시설물의 탄소배출량 산정은 시설물 전생애 단계에서의 탄소배출량을 산정하여야 하는 것으로, 기획, 계획, 설계, 시공 및 운영의 Life Cycle 단계별 탄소배출량을 산정하는 것임.

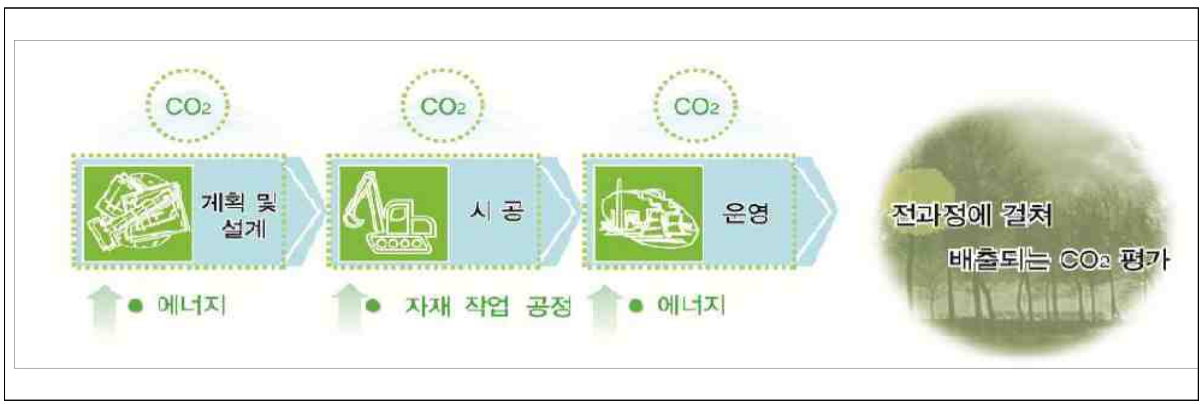


그림 3-2-1-179. 탄소배출량 산정 절차

㉡ 일반적으로 단계별 탄소배출량 산정 절차는 ① 평가 범위 및 경계 설정, ② 데이터의 수집 및 분석, ③ 도로 시설물의 탄소배출량 산정 절차 등에 의해 이루어짐.

- ① 평가 범위 및 경계 설정 : 평가 범이 및 경계설정은 도로시설물의 Life Cycle을 분석 및 Life Cycle의 단계별 적용 범위를 설정하고, 배출원을 규명하는 단계임.
- ② 데이터의 수집 및 분석 : 도로 시설물의 Life Cycle 단계별 배출량 산정 데이터를 조사·분석하고 Cut-off 수준을 설정하는 단계임.
- ③ 도로 시설물의 탄소배출량 산정 : Life Cycle 단계별 조사 데이터를 이용한 배출량 산정식을 설정하며, 사용 데이터베이스 및 배출계수를 연결한 후 Life Cycle 단계별, 시공단계(공종별, 공정별) 탄소배출량을 산정하는 단계임.

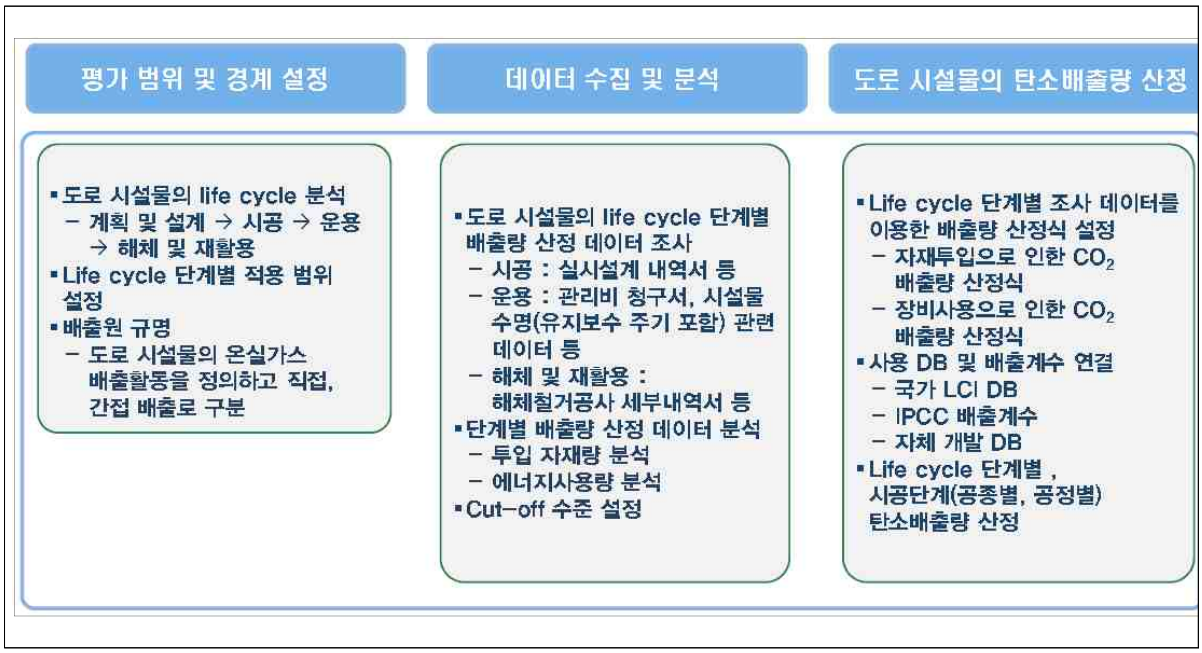


그림 3-2-1-180. 탄소배출량 산정 절차

ⓐ Setp 1. 데이터의 수집 및 분석

㉠ 데이터의 수집

- 실시설계 내역서(보고서)
- 일위대가표(호표, 단가산출)
- 최신 건설공사 표준품셈
- 소요자원 집계표
- 중기 사용 내역서, 중기 기초자료
- 기타 자재투입량 및 장비사용량 산정을 위하여 평가자가 필요하다고 인정하는

자료

- 자재 및 에너지원별 온실가스 배출 원단위



그림 3-2-1-181. 데이터의 수집 및 분석

ⓑ Setp 2. 공종별 투입자재량 산출

㉠ 수집된 데이터(설계내역서, 일위대가 등)를 이용하여 공종별 투입자재량을 산출함.

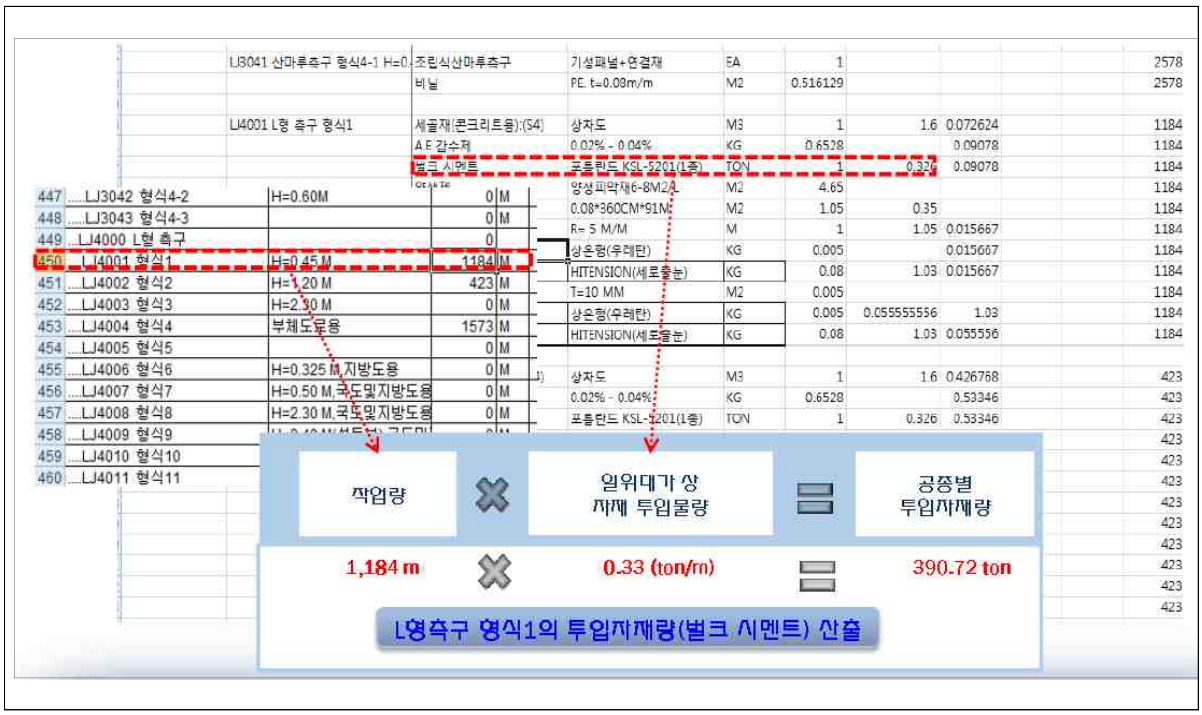


그림 3-2-1-182. 공종별 투입자재량 산출

ⓒ Setp 3. 작업별, 장비별 에너지 사용량 산출

㉠ 본 단계에서는 수집된 데이터(설계내역서, 일위대가 등)를 이용하여 작업별, 장비별 에너지 사용량을 산출함.

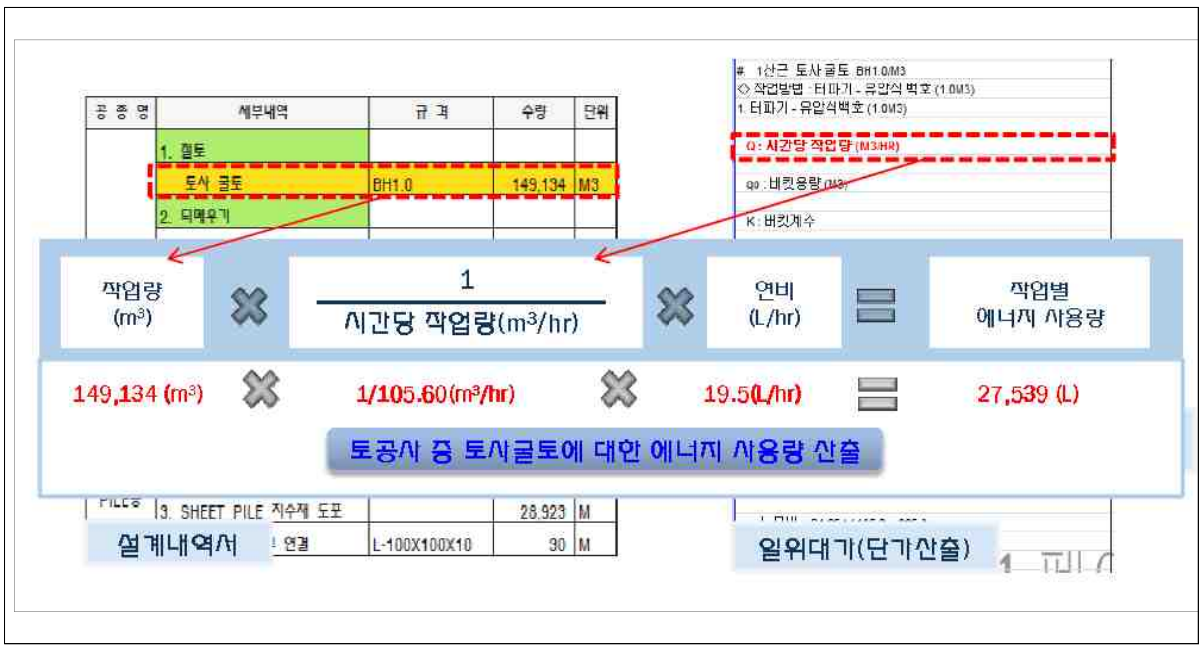


그림 3-2-1-183. 작업별, 장비별 에너지 사용량 산출

ⓓ Setp 4. 건설자재 투입량에 따른 탄소배출량 선정

㉠ 공종별 자재투입에 따른 탄소배출량을 산정하는 단계이며, 탄소배출량 산정식은 다음과 같음.



그림 3-2-1-184. 건설자재 투입량에 따른 탄소배출량 산정

㉡ 예시)

- 공종 : 포장공사
- 공정 : 시멘트포장
- 투입자재 : 1종 보통포틀랜드 시멘트
- 시멘트포장공정 시멘트 투입량 : 1,920kg(데이터 수집 및 분석 단계 결과 값)
- 연결 데이터베이스 : $0.944kg-CO_2/kg$(지식경제부 국가 LCI DB)
- 포장공사 중 시멘트포장 공사의 시멘트 투입으로 인한 CO_2 배출량
  = 자재 투입량 × 작업량(시공량) × 배출계수
  = 1,920 × 0.944 × 1/1000 = 1.81 tCO_2

ⓔ Setp 5. 건설장비 사용에 따른 탄소배출량 선정

㉠ 공종별 장비사용에 따른 탄소배출량 산정단계로 산정식은 다음과 같음.



그림 3-2-1-185. 건절장비 사용에 따른 탄소배출량 산정

㉡ 예시)

- 공종 : 부대토목공사
- 공정 : 토공사
- 사용장비 : 유압식백호우 1.0㎥
- 작업별 에너지 사용량 : 23,425L(에너지원 : 경유)
- 경유의 순발열량 : 8,450kcal/L
- 탄소배출계수 : 0.000310kgCO_2/kcal(IPCC 기본값)
- 부대토목공사 중 토공사의 유압식백호우 1.0㎥ 사용으로 인한 CO_2 배출량
  = 작업량 ÷ 시간당 작업량 × 연비 × 순발열량 × 탄소배출계수
  = 1 ÷ 1000 × 23,425 × 8,450 × 0.000310 = 61.36 tCO_2

㉢ 도로 시설물의 탄소배출량 저감을 위한 방안

㉠ 도로 시설물 공사에서 탄소배출량 저감을 위한 방안은 매우 다양하며, 형식변경, 자재변경, 공법변경 등이 대표적인 방법임.

ⓐ 형식의 변경 : 일반교량 VS일체식 교량

㉠ 설계상 일반교량의 경우 일체식 교량으로 교체함으로써 이산화탄소 배출량의 저감이 가능함.

신축이음장치 미설치 : 기존 교량 대비 재료 신축이음장치 투입량의 감소로 인한 CO_2 저감

교량의 유지관리보수의 대부분을 차지하는 신축이음 장치 미설치로 인한 유지관리의 최소화 : 기존 교량 대비 유지관리 장비 및 원자재 투입 최소화로 인한 CO_2 저감

교대 단면 축소(약 20%) : 콘크리트(시멘트, 골재 및 물) 및 강재 등 물량 감소로 인한 CO_2 저감

무다짐 뒤채움 : 돌망태를 활용(강자갈 혹은 골재)함으로써 CO_2 저감

㉡ 일체식 교량

교량 전체에 신축이음 장치를 두지 않고 상부구조를 교대에 일치시킨 일체구조 형식의 교량

조인트가 존재하지 않아 무조인트 교량이라고 하며, 상부구조와 말뚝과 교대가 일체로 구성되어 있어 일체식 교량이라고도 함.

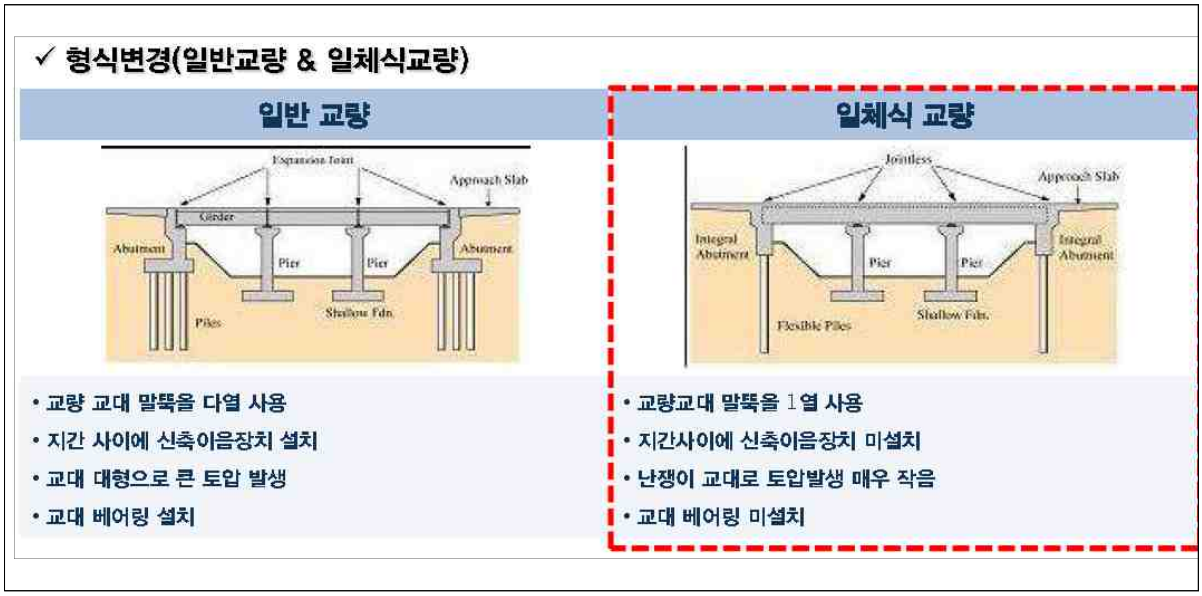


그림 3-2-1-186. 형식변경(일반교량&일체식교량)

ⓑ 자재의 변경 : 일반아스팔트 VS재생아스팔트

㉠ 사용되는 자재를 변경함으로써 이산화탄소 배출량을 저감하는 방법임.

기존 아스팔트 포장은 CO_2 과다 배출 및 폐아스콘 등 처리비용이 과다 소요 → 특히 반고체인 아스팔트와 차가운 골재를 벙커C유 등 화석연료를 사용해 180℃로 가열하는 방식으로 CO_2 배출량 과다

따라서 재생아스팔트 사용은 일반아스팔트 생산시 필요한 화석원료 및 골재저감에 따른 CO_2 저감이 가능함.

㉡ 재생아스팔트

재생가열 아스팔트 혼합물이라 함은 아스팔트 도로포장의 유지보수나 굴착공사시에 발생한 아스콘 발생재를 기계 또는 가열파쇄하여 아스콘 순환골재를 생산한 후, 소요의 품질이 얻어지도록 보충재를 가하고 재생장비를 이용하여 생산한 혼합물을 의미함.

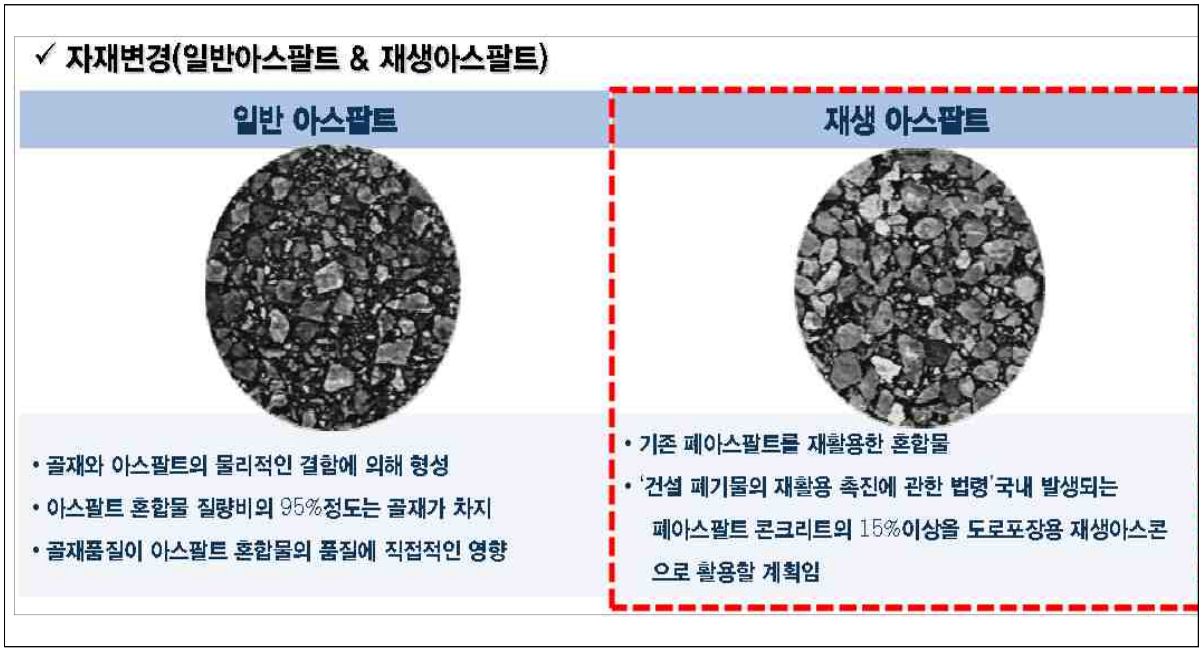


그림 3-2-1-187. 자재변경(일반아스팔트&재생아스팔트)

ⓒ 공법 변경 : 일반콘크리트 포장 VS 린콘크리트 포장

시공방법을 변경함으로써 CO_2를 저감하는 방안으로 일반콘크리트 포장과 린콘크리트 포장을 비교하면 다음과 같음.

린콘크리트 적용으로 인한 포장두께 감소(15cm ⇒ 12cm, ex)구미~동대구간 제4공구) → 투입물량 최소화에 따른 CO_2 저감

린콘크리트 적용으로 인한 시멘트 사용량 최소화(산업부산물인 플라이애시와 슬래그 등) → 시멘트 사용량 절감에 따른 CO_2 저감

기존 기층재료(천연 및 쇄석골재 등) 대신 린콘크리트 적용에 따른 탄소저감 효과 극대화

린콘크리트

무근콘크리트 또는 버림콘크리트 등이라 불리며 영어원문으로 해석하자면 시멘트가 적게 들어간 콘크리트를 의미함.

보통 기층재료로 활용하고 있으며, 쇄석골재나 일반콘크리트 대체재로 활용되고 있

음.

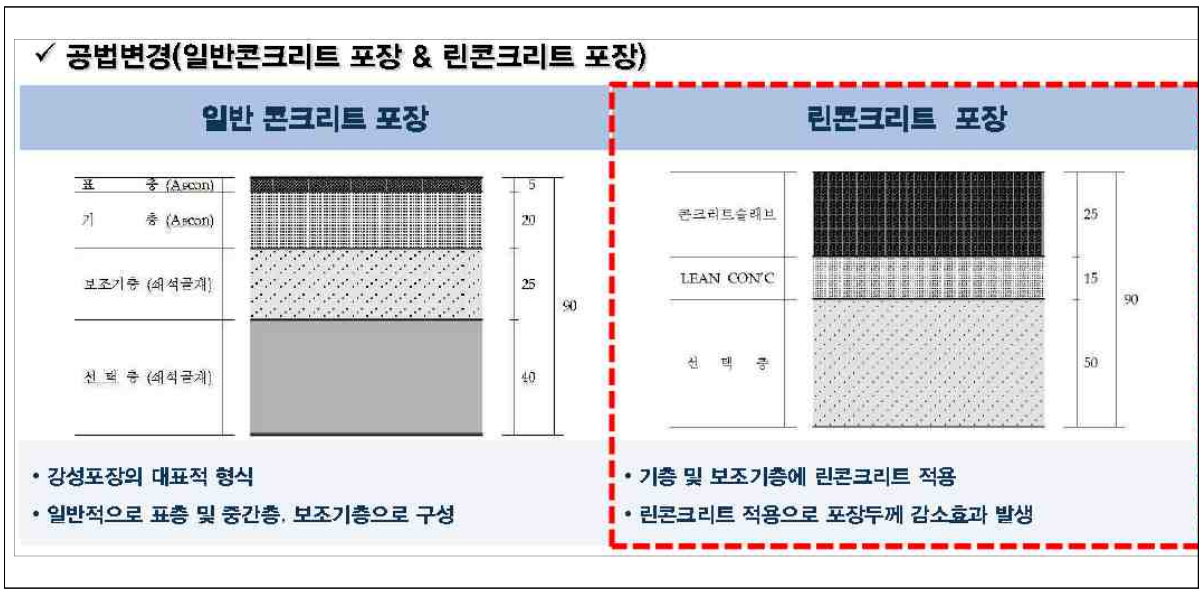


그림 3-2-1-188. 공법변경(일반콘크리트포장&린콘크리트포장)

㉰ 도로 시설물의 탄소배출량 선정 사례

ⓐ 자재투입에 따른 탄소배출량

㉠ 자재투입으로 인한 탄소배출은 시공단계 탄소배출량 중 약 9.07%인 1,089.01 tCO_2임.

투입된 자재 중 레미콘으로 인한 탄소배출이 전체 배출량의 87.7%(954.71tCO_2)에 해당됨.

ⓑ 장비사용에 뜨른 탄소배출량

㉠ 장비사용으로 인한 탄소배출은 시공단계 탄소배출량 중 약 90.93%(10,914.99 tCO_2)임.

장비에 사용된 에너지원 중 경유사용으로 인한 탄소배출 비율은 공종별로 터널공과 지반처리공이 매우 높고, 토공, 포장공 및 교량공에서는 낮음.

표 3-2-1-78. 공종별 이산화탄소 발생량 및 발생비율

공종	자재		장비		합계	
	CO_2 발생량 (tCO_2)	비율 (%)	CO_2 발생량 (tCO_2)	비율 (%)	CO_2 발생량 (tCO_2)	비율 (%)
지반처리공	34.79	0.01	10,825.20	99.99	10.860.00	100.00
포장공	789.79	94.75	43.77	5.25	833.56	100.00
토공	52.11	87.57	7.40	7.43	59.51	100.00
터널공	-	-	38.20	100.00	38.20	100.00
교량공	212.32	99.80	0.42	0.20	212.74	100.00
합계	1,089.01	9.07	10,914.99	90.93	12,004.00	100.00

㉮ 분석의 전제

ⓐ분석 기법

㉠ ISO14040에 의하면 전 과정 평가(LCA, Life Cycle Assessment)란 제품시스템의 전 과정에서 과련 투입물과 산출물에 대한 목록을 작성하고 이들과 연관된 잠재적인 환경영향을 평가하며, 연구목적과 관련해서 목록분석 결과와 영향평가 결과를 해석함으로써 제품과 연관된 환경측면과 잠재적인 환경영향을 평가하기 위한 기법임.

㉡ 이산화탄소 배출량 산정기법으로는 크게 산업연관분석법과 개별적산법이 있으며, 이중 산업연관분석법은 산업연관표를 이용하여 부문 간 가격을 기준으로 원자재와 에너지가 조사대상 제품으로 분배된 경과와 이유를 역으로 분석해 가는 방법이기 때문에 산업연관표에 들어 있은 항목에 관한 공업제품과 기술을 분석하기에는 불충분함.

㉢ 또한 산업연관분석법은 신기술이나 재활용 같이 아직 산업연관표에 들어 있지 않는 항목 및 제조 인프라가 없는 경우에는 분석이 불가능함.

㉣ 따라서 방대한 범위의 건축자재와 관련된 건설 산업의 경우 환경부하 이산화탄소 원단위 데이터베이스 구축에 있어서도 건축자재 관련 항목이 절대적으로 부족하기 때문에 이산화탄소를 포함한 오염물질 배출에 관한 정량적 평가가 어려움.

㉤ 한편 국가 LCI DB를 구축하기 위한 방법으로 쓰인 개별적산법은 제품과 시스템을 설계도서와 견적서 등으로부터 제조공정, 소재 등으로 구분하여 원료의 추출에서부터 제조 및 가공, 수송 및 유통, 사용, 최종 폐기에 이르는 한 제품이나 공정의 전 과정 동안의 에너지 및 원료 소요량과 환경배출물질을 정량화하여 구체적으로 조사하고, 목록을 작성하는 방법임.

㉥ 이에 초장대교량 건설용 콘크리트 개발기술에 대하여 이산화탄소 배출량을 산정하기 위하여 개별적산법에 의하여 목록화 되어 있는 국가 LCI DB 등을 활용하여야 함.

㉦ 그러나 앞서 ‘3.1.2. 도로 시설물의 탄소배출량 산정’에서 설명한 바와 같이 전과정평가를 위해서는 도로 시설물의 기획, 계획, 설계, 시공 및 운영의 Life Cycle 단계별 탄소배출량을 산정하여야 함.

㉧ 따라서 본 연구에서는 초장대교량 건설용 콘크리트 개발기술에 대하여 전과정평가를 수행하기 이전 단계로 콘크리트 개발기술에 대하여 콘크리트 생산과정에서

발생하는 이산화탄소 배출량 산정에 한정하여 분석함.

ⓑ 콘트리트의 CO2 배출량 평가

㉠ 콘크리트의 CO_2 배출량 평가는 생산단계별로 구분하여 자재단계, 운송단계, 제조단계 등 전 과정에 거쳐 소모되고 배출되는 에너지 및 CO_2를 정량화하여 이들이 환경에 미치는 영향을 총체적으로 평가하고, 이를 토대로 환경개선의 방안을 모색하고자 하는 객관적이며 적극적인 환경영향 평가로 정의할 수 있음.

㉡ 본 분석에서는 콘크리트의 CO_2 배출량 평가 중 자재단계만을 분석함.

초장대교량 건설용 콘크리트 개발기술은 시멘트의 일부를 산업부산물인 고로슬래그미분말과 플라이애시를 사용하고 있음.

ⓒ 자재단계

㉠ 자재단계의 CO_2 배출량 평가를 위한 재료는 시멘트, 물, 굵은 골재, 잔골재, 혼화재료로 구성될 수 있음.

화학혼화제인 고성능감수제 및 수중불분리혼화제의 CO_2 배출량은 분석에서 제외함.

㉡ 콘크리트 생산에 따른 CO_2 배출량은 콘크리트 배합에 사용되는 각 구성 재료의 생산시 발생되는 CO_2의 원단위를 이용하여, 1㎥당 콘크리트 생산에 포함되는 각 구성 재료의 양(kg)에 원단위 CO_2 발생량을 곱하여 산정함.

- 각 재료별 CO_2 배출량은 국가 LCI DB(http://www.edp.or.kr)을 기준으로 함.
- 또한 국가 LCI DB에 구축되지 않는 자료는 국내 논문 및 일본토목학회(JSCE)의 CO_2 배출량 원단위(개별적산법) 자료 등을 활용함.

표 3-2-1-79. 사용재료별 원단위 이산화탄소 배출량

구분	원단위 CO_2 배출량(kg-CO_2/kg)			비고
	국가 LCI DB[주1)]	문헌자료[주2)]	일본토목학회[주3)]	
포틀랜드시멘트	0.9440			
잔골재		0.0013		
굵은 골재		0.0040		
물		0.2040		
고로슬래그미분말			0.0265	
플라이애시			0.0196	

주1) 국가 LCI DB(http://www.edp.or.kr)
주2) 이강희 등(2009), 주요 건축자재의 에너지 소비와 이산화탄소 배출원 단위 ㅅ나정 연구, 대한건축학회 논문집, 제25권 6호, pp. 43~50
주3) 日本土木學會(2005), コンクリト構造物の 環境性能照査指針(試案), pp. 48~52

㉢ 단위 콘크리트 생산에 따른 이산화탄소의 배출량은 다음과 같이 구함.

$$CO_{2,1m^3} = \sum(M_i \times E_i)$$

- $CO_{2,1m^3}$: 단위콘크리트 생산에 따른 자재단계의 CO_2 배출량$(kg-CO_2/m^3)$
- M_i : 콘크리트 1㎥ 당 i 재료의 사용량(kg)
- E_i : 각 사용 재료의 원단위 CO_2 배출량$(kg-CO_2/kg)$

ⓓ 분석대상 콘크리트 배합

㉠ 분석대상 콘크리트 배합은 초장대교량 건설용 콘크리트 개발기술과 기존기술의 배합을 기준으로 해상기초용, 주탑용 및 앵커리지용으로 구분하여 분석하였으며, 각 콘크리트 배합은 다음과 같음.

표 3-2-1-80. 고주탑용 고압송 콘크리트

구분	설계강도 (MPa)	단위중량(kg/㎥)							
		W	C	GGBF	FA	S	G[주1)]	SP	수중불분리혼화제
기존기술	40	158	248	165	0	721	959	6.5	-
개발기술	40	155	211	211	47	761	910	3.2	-

주1) 기존기술 G_{max} = 20mm, 개발기술 G_{max} = 25mm

표 3-2-1-81. 해상기초용 복합성능 콘크리트

구분	설계강도 (MPa)	단위중량(kg/㎥)							
		W	C	GGBF	FA	S	G	SP	수중불분리혼화제
기존기술	35	210	500	-	-	636	859	2.5	2.5
개발기술	35	204	275	275	-	696	833	2.5	2.0

표 3-2-1-82. 앵커리지용 초저발열 콘크리트

구분	설계강도 (MPa)	단위중량(kg/㎥)							
		W	C주1)	GGBF	FA	S	G	SP	수중불분리혼화제
기존기술	35	164	447	-	-	806	932	3.6	-
개발기술	35	135	226	134	87	820	937	4.0	-

주1) 저열시멘트

ⓔ 각 공사별 전체 콘크리트 생산 물량

㉠ 각 공사별 전체 콘크리트 생산 물량은 본 보고서의 '제3장 2. 개발기술의 공사원가 2.2. 콘크리트 물량 산출근거'의 각 공사별 콘크리트의 물량을 기초자료로 분석함.

㉮ 분석 결과

ⓐ 콘크리트 1m3 당 CO2 배출량

㉠ 기존기술 대비 초장대교량 건설용 콘크리트의 개발기술별 콘크리트 1㎥당 이산화탄소 배출량 저감률은 고주탑용, 해상기초용 및 앵커리지용 콘크리트가 각각 14.64%, 39.75% 및 69.58%로 분석됨.

- 고주탑용 콘크리트 : 기존기술 275.49 → 개발기술 241.95, 저감률 12.18%
- 해상기초용 콘크리트 : 기존기술 519.10 → 개발기술 312.74, 저감률 39.75%
- 앵커리지용 콘크리트 : 기존기술 460.20 → 개발기술 250.95, 저감률 45.47%

표 3-2-1-83. 콘크리트 1m^3 당 CO_2 배출량

구분	CO_2 배출량(kg-CO_2/m^3)		기존기술 대비 CO_2 배출 저감률(%)	비고
	기존기술	개발기술		
고주탑용 콘크리트	275.4898	241.9460	12.18	
해상기초용 콘크리트	519.1028	312.7403	39.75	
앵커리지용 콘크리트	460.1998	250.9542	45.47	

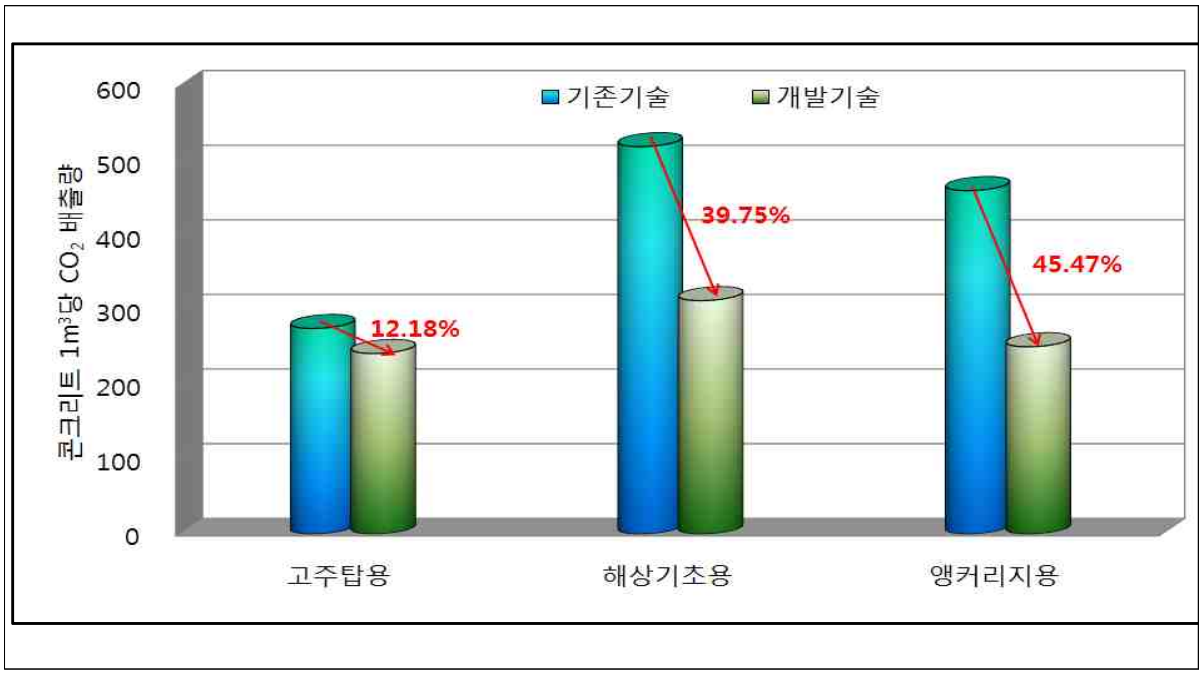


그림 3-2-1-189. 콘크리트 1m3 당 CO2 배출량

ⓑ 공종별 콘크리트의 CO2 배출량

㉠ 공종별 콘크리트 생산 및 타설 공사에서 발생되는 CO2 배출량을 분석한 결과는 다음과 같음.

- 주탑공사 : 기존기술 대비 개발기술의 CO_2 배출 저감량은 8,769tCO_2임.
- 단부교각공사 : 기존기술 대비 개발기술의 CO_2 배출 저감량은 2,102tCO_2임.
- 앵커리지공사 : 기존기술 대비 개발기술의 CO_2 배출 저감량은 3,404tCO_2임.

표 3-2-1-84. 공종별 이산화탄소 배출량

구분		콘크리트물량 (㎥)	CO_2 배출량(t-CO_2/㎥)		공종별 CO_2배출량(tCO_2)		
			기존기술	개발기술	기존기술	개발기술	저감량
주탑공사	현장타설말뚝	26,429	0.2755	0.2419	7,281	6,394	887
	기둥&코핑	38,195	0.5191	0.3127	19,827	11,945	7,882
	소계				27,108	18,340	8,769
단부교각공사	현장타설말뚝	10,186	0.5191	0.3127	5,288	3,186	2,102
앵커리지공사	앵커리지	16,270	0.4602	0.2509	7,487	4,083	3,404

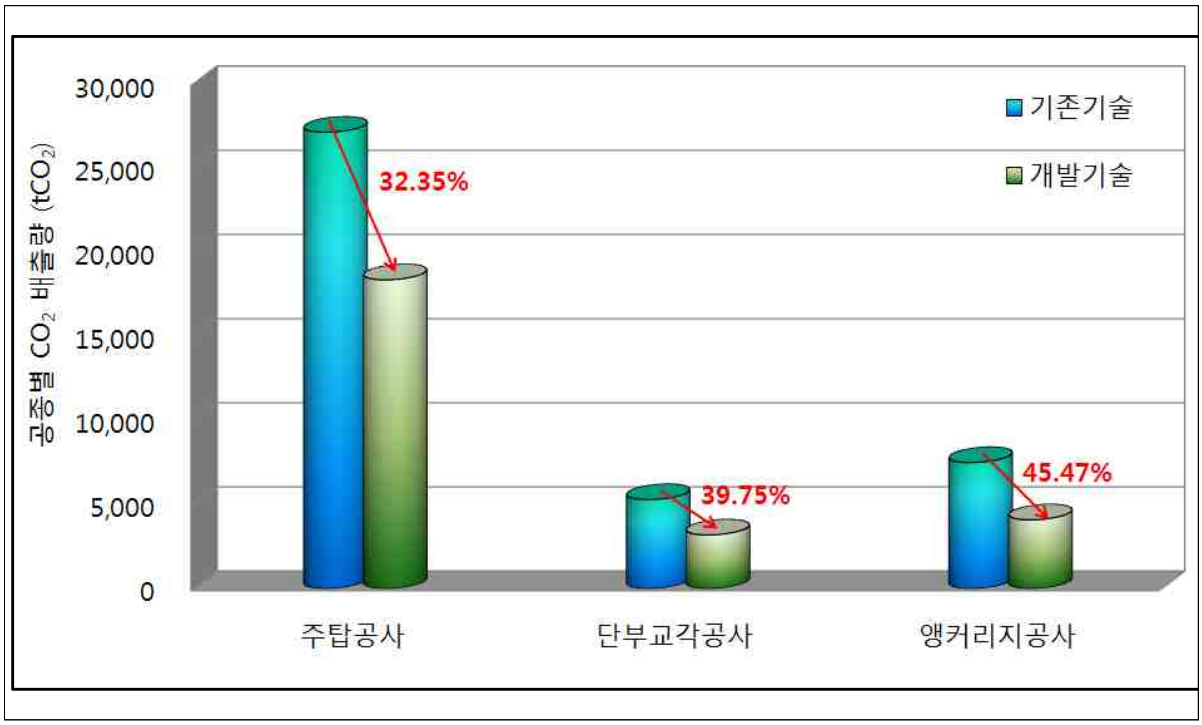


그림 3-2-1-190. 공종별 콘크리트의 CO2 배출량

ⓒ 이산화탄소 배출량 저감에 따른 경제적 효과

㉠ 탄소배출권

Ⓐ 탄소배출권(CER, Certified Emission Reduction) : CDM 사업(온실가스를 줄이는 사업)을 통해서 온실가스 방출량을 줄인 것에 유엔의 담당기구에서 확인해 준 것을 말하며, 이러한 탄소배출권은 배출권거래제에 의해서 시장에서 거래될 수 있음.

Ⓑ 우리나라는 2003년 1월 예정이던 탄소배출권거래제도 도입을 2015년으로 연기함.

㉡ 탄소배출권 시장

Ⓐ 탄소배출권 최고가격은 32유로를 기록한 이후 2013년 1월 현재 톤당 5유로 수준임.

Ⓑ 본 분석에서는 2013년 1월 기준 탄소배출권 거래가격의 평균값인 약 5유로를 사용하여 개발기술의 이산화탄소 배출저감에 따른 경제적 효과를 분석하고자 함.

이산화탄소 1톤당 거래가격 : 5유로/톤 × 1,446.21원/유로 = 7,231.05원/톤

Ⓒ 공종별 이산화탄소 저감에 따른 경제적 효과는 다음과 같음.

표 3-2-1-85. 공종별 이산화탄소 배출량

구분		공종별 CO_2배출량(tCO_2)			톤당 거래가격(원)	경제적 효과 (원)	
		기존기술	개발기술	저감량			
주탑공사	현장타설말뚝	7,281	6,394	887	7,231.05	6,410,536	
	기둥&코핑	19,827	11,945	7,882	7,231.05	56,995,250	
	소계	27,108	18,340	8,769	7,231.05	63,405,786	
단부교각공사	현장타설말뚝	5,288	3,186	2,102	7,231.05	15,199,728	
앵커리지공사	앵커리지	7,487	4,083	3,404	7,231.05	24,617,574	

주)톤당 이산화탄소 거래가격은 2013년 1월 기준 탄소배출권 평균 거래가격인 5유로를 원화로 환산한 가격임.

(4) 공정 분석

① 분석의 전체

㉠ 초장대교량 건설용 콘크리트 개발기술 중 해상기초용 복합성능 콘크리트 개발기술과 앵커리지용 초저발열 콘크리트 개발기술은 기존 콘크리트 기술을 대체하는 기술로 시공 과정에서의 공정변화는 없는 것으로 가정함.

해상기초용 복합성능 콘크리트 개발기술은 현장타설말뚝 공사에 적용되어 공정변화가 없음.

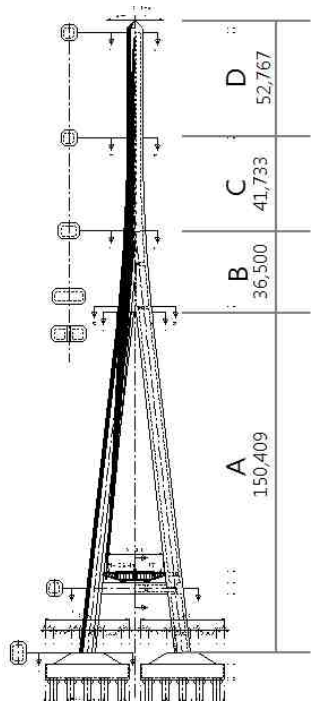
앵커리지용 초저발열 콘크리트 개발기술은 현수교 공사 중 앵커리지공에만 적용하였으며, 별도의 공정변화는 없는 것으로 가정함.

㉡ 한편 고주탑용 고압송 콘크리트 개발기술은 기존 콘크리트 타설방법이 버킷(또는 호퍼)인 반면 개발기술은 콘크리트 펌프카 타설로 공사원가 분석시 타설방법의 변경에 따른 공사비 변경 사항을 반영하였으며, 시공 속도에 따른 공사기간 단축을 분석함.

㉢ 주탑공사의 콘크리트의 타설은 매스콘크리트 타설로 다음과 같은 가정 하에서 분석함.

- 기상여건에 따른 영향은 본 분석에서 제외함.
- 콘크리트 타설은 주탑 1개소씩 타설하는 것으로 가정함.
- 1일 콘크리트 평균 타설높이(1Lot)를 3.5m 이하
- 콘크리트 타설(펌프카+배관) 1시간당 평균 타설량 : 15㎥
- 콘크리트(크레인+버킷) 1시간당 평균 타설량 : 8㎥
- 콘크리트 양생은 평균 4일을 기준으로 함.
- 콘크리트 1회 타설공사의 평균 공기는 콘크리트 타설시간과 양생시간을 더한 기간으로 기존기술(크레인+버킷)은 5.5일~6.0일, 개발기술(펌프카+배관)은 5.0일이 소요됨.

표 3-2-1-86. 주탑공사 1회 타설량 및 타설회수



• 주탑공사의 구간별 평균 단면적, 평균높이 및 타설회수는 다음과 같음.

구분	평균단면적 (㎡)	평균높이 (m)	1회 타설량 (㎥)	타설회수 (회)	비고 (1회 3.5m)
D	25.429	52.767	89.0015	15	15.076
C	27.415	41.733	95.9525	12	11.924
B	36.872	36.500	129.0520	11	10.428
A	38.686	150.409	135.4010	43	42.974

구분	1회타설량 (㎥)	타설회수 (회)	타설시간(hr)		타설일수	
			기존기술	개발기술	기존기술	개발기술
D	89.0015	15	11.13	5.93	1.39	0.74
C	95.9525	12	11.99	6.40	1.50	0.80
B	129.0520	11	16.13	8.60	2.02	1.08
A	135.4010	43	16.93	90.3	2.12	1.13
합계		81				

② 분석결과

㉮ 주탑공사의 공기 단축

㉠ 주탑공사 콘크리트공의 공사기간을 분석한 결과 기존기술의 경우 총 946일이 소요된 반면 개발기술의 경우 810일이 소요되어 콘크리트 타설공사의 공사기간 단축비율은 약 14.39%임.

표 3-2-1-87. 주탑공사 콘크리트 타설공사의 공사기간

구분	1회타설량 (㎥)	타설회수 (회)	1Cycle 공기		주탑 1개소 공사기간(일)		주탑 전체공사기간(일)	
			기존기술	개발기술	기존기술	개발기술	기존기술	개발기술
A	89.0015	15	5.5	5.0	83	75	166	150
B	95.9525	12	5.5	5.0	66	60	132	120
C	129.0520	11	6.0	5.0	66	55	132	110
D	135.4010	43	6.0	5.0	258	215	516	430
합계		81			473	405	946	810

㉯ 공사기간 단축에 따른 관리비 절감효과

㉠ 공사기간 단축에 따른 관리비 절감효과는 현장에 상주하는 관리인력 등의 인건비를 기준으로 분석함.

㉡ 분석 대상 건설현장에는 현장소장 1명, 공무 2명, 품질 2명, 안전 2명, 공사 4명, 관리 1명, 감리회사 직원 4명 및 협력사 5명이 상주하고 있는 것으로 가정함.

표 3-2-1-88. 건설현장 상주인원 현황

구분	시공사						감리사	협력사	합계
	소장	공무	품질	안전	공사	관리			
인원(명)	1	2	2	2	4	1	4	5	21
기술사	1								
특급기술자					1				
고급기술자			1	1	1		2	1	
중급기술자			1	1	1		1	2	
초급기술자					1		1	1	
차장급		1							
대리급		1							
사원급						1		1	

㉠ 분석 대상 건설현장에서 상주하는 인원의 월 인건비 지급내역은 OO~OO간 고속도로 확장공사 현장 상주인원의 직무별 월 인건비 지급내역과 한국엔지니어링협회에서 조사발표한 2011년 엔지니어링업체 임금실태조사결과를 기준으로 공사기간 단축에 따른 관리인력의 인건비 절감효과를 분석하고자 함.

표 3-2-1-89. 00~00구간 고속도로 확장공사 현장 상주인원 인건비 현황

구분	직무					
	소장	공무	품질	안전	공사	관리
특급기술사	6,360,000					
고급기술자			4,385,000	4,385,000	4,494,000	
중급기술자			3,653,000		3,653,000	
초급기술자			2,974,000		2,974,000	
차장급		5,639,000				
과장급					4,494,000	
대리급		3,653,000				
사원급		2,974,000				2,123,000

- 엔지니어링기술자 노임단가는 1일 단가로 공표가 되었으며, 평균 근무일수는 건설 및 기타분야가 22.11일로 조사됨.

한국엔지니어링협회 공표(경영2011-2919호)

2011 엔지니어링업체 임금실태조사결과 공표

본 협회에서 실시한 2011년도 엔지니어링업체 임금실태조사(통계승인 제37201호) 결과를 통계법 제27조에 따라 아래와 같이 공표합니다.

가. 엔지니어링기술자 노임단가

구 분	원자력발전	산업공장	건설 및 기타
기술사	412,124원	388,830원	330,109원
특급기술자	368,158원	346,318원	258,612원
고급기술자	308,849원	259,132원	205,855원
중급기술자	261,341원	218,166원	181,472원
초급기술자	197,919원	171,467원	133,629원
고급숙련기술자	302,968원	174,727원	145,353원
중급숙련기술자	223,375원	149,677원	136,981원
초급숙련기술자	149,039원	121,474원	115,960원

나. 평균근무일수

구 분	원자력발전	산업공장	건설 및 기타
평균근무일수	22.05일	22.1일	22.11일

다. 공표 및 적용일 : 2012년 1월 1일부터

한국엔지니어링협회장

[임금통계작성기관 (통계청승인 제37201호)]

그림 3-2-1-191. 2011 엔지니어링업체 임금실태조사결과 공표

표 3-2-1-90. 한국엔지니어링협회 직급별 월인건비 현황

구분	일단가	군무일수	월인건비	비고
기술사	330,109	22.11	7,298,710	
특급기술자	258,612	22.11	5,717,911	
고급기술자	205,855	22.11	4,551,454	
중급기술자	181,472	22.11	4,012,346	
초급기술자	133,629	22.11	2,954,537	

㉢ 고주탑용 고압송 콘크리트 개발기술의 적용에 따른 공사기간 단축으로 발생하는 현장 상주인력의 인건비 절감액은 165,356천원으로 분석됨.

표 3-2-1-91. 공기단축에 의한 관리비 절감효과

구분	합계	기술사	특급	고급	중급	초급	차장	대리	사원
인원(명)	21	1	1	6	6	3	1	1	2
월인건비(천원)	-	7,298	5,717	4,551	4,012	2,954	5,639	3,653	2,123
단축공기(개월)	-	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
절감효과(천원)	161,762	32,841	25,727	20,480	18,054	13,293	25,376	16,439	9,554

㉣ 공사기간 단축에 따른 건설장비 운용비 절감효과

㉠ 공사기간 단축에 따른 건설장비 운용비 절감효과는 본 분석대상 공사에서 사용되는 해상크레인에 대하여 분석함.

㉡ 분석 대상 공사에 적용되는 건설장비의 운용비는 다음과 같음.

타워크레인(주탑, G10745)) : 월 임대료 : 22,300,000원

㉢ 공사기간 단축에 따른 건설장비 운용비 절감효과는 건설장비 월 임대료에 단축된 공사기간을 곱하여 산정함.

㉣ 건설장비 운용비 절감액은 100,350천원임.

22,300,000원/월 × 4.5월 = 100,350천원임.

(5) 경제성 분석 결과

㉠ 초장대교량 건설용 콘크리트 개발기술의 공종별 경제성 분석결과는 다음과 같음.

표 3-2-1-92. 개발기술별 경제성 분석 결과

구분	금액(원)			기존공법 대비 비율(%)
	기존공법	개발기술	증감액	
주탑공사				
총공사비	12,380,153,229	11,721,862,452	-658,290,777	-5.32
인건비		-161,761,500		
건설장비운용비		-100,350,000		
CO2배출량저감		-63,405,786		
최종 공사비	12,380,153,229	11,396,345,166	-983,808,063	-7.95
단부교각공사				
총공사비	1,983,917,505	1,860,866,224	-123,051,281	-6.20
인건비				
건설장비운용비				
CO2배출량저감		-15,199,728		
최종 공사비	1,983,917,505	1,845,666,496	-138,251,009	-6.97
앵커리지공사				
총공사비	1,933,904,899	1,775,351,735	-158,553,164	-8.20
인건비				
건설장비운용비				
CO2배출량저감		-24,617,574		
최종 공사비	1,933,904,899	1,750,734,161	-183,170,738	-9.47

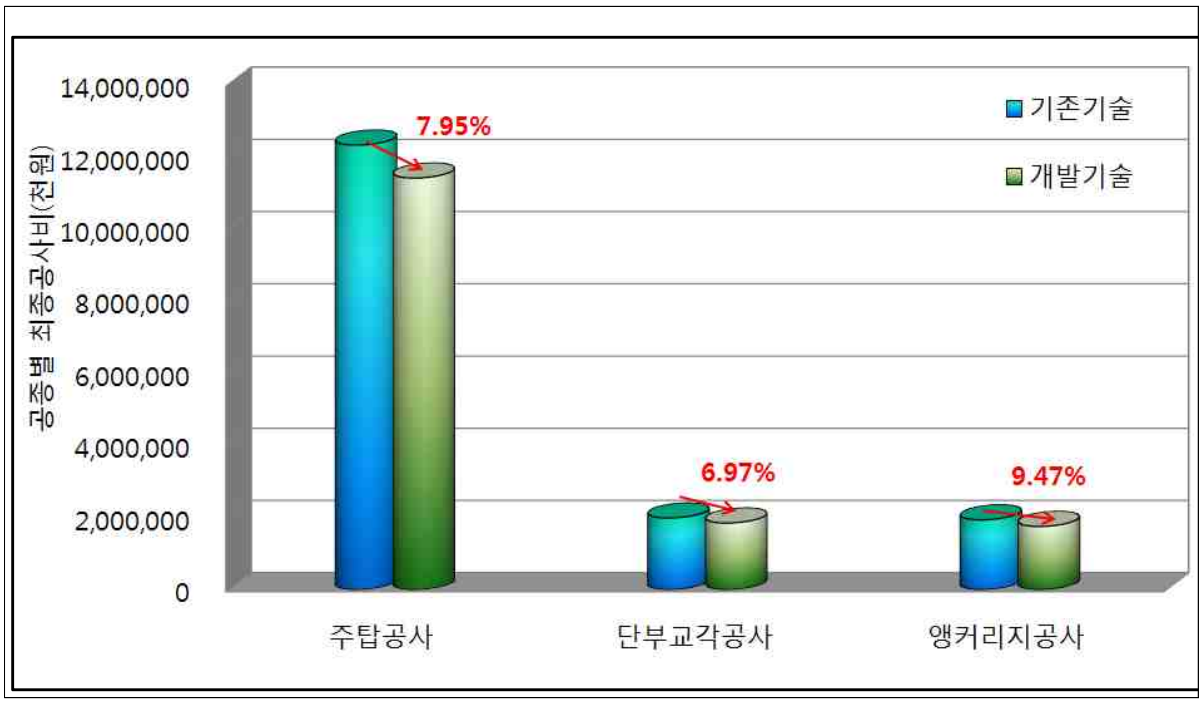


그림 3-2-1-192. 공종별 최종공사비

마. 요약 및 결론

(1) 높이 400m 이상의 고주탑 시공용 고압송 콘크리트 개발 및 현장타설 기술 실용화

고주탑 시공용 고압송 콘크리트 개발 및 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 콘크리트의 설계 기준강도를 만족하고 압송성을 극대화 시킬 수 있도록 점도를 낮추기 위하여 페이스트 및 모르타르를 제조하여 사용분체를 검토한 결과 고로슬래그 미분말, 플라이 애쉬 및 실리카 흄의 적절한 사용이 유리한 것으로 나타났다.
- 설계기준강도 40, 50 및 60MPa의 콘크리트 배합을 이용하여 유변학적 특성과 압축강도 특성을 분석한 결과 고로슬래그 미분말 또는 플라이 애쉬를 사용한 2성분계 배합보다는 각각의 분체를 적절히 사용한 3성분계의 콘크리트가 점도 및 항복값을 낮추는데 유리하였고, 압축강도는 분체의 포졸란반응과 같은 잠재수경성의 영향으로 재령 28일 이후에는 압축강도가 회복되었다.
- 입체가압형을 활용한 모르타르의 가압 전·후 물성 검토 결과 점도는 가압 후가 감소하고 항복값은 증가하는 경향이 있다. 이러한 경향은 항복값의 경우 플로우와 관련이 있고 시간이 경과함에 따라서 모르타르가 경화되어 플로우가 감소하기 때문이며, 일정가압형 간이 압송 장치를 활용하여 콘크리트의 압송 전·후 물성 검토 결과는 압송한 후의 점도 및 항복값이 다소 증가하는 것으로 나타났다.
- Semi scale test를 통하여 실제 Mock-up 시험을 하지 않고서도 소규모의 상사실험을 통한 콘크리트 압송의 물성 파악을 위한 연구이론을 도출하였다. 이는 새로운 모델링 기법을 도입함으로써 콘크리트 유동조건을 상사화 시킬 수 있는 방법을 체계화 함으로써 콘크리트 배합 설계후 요구되는 물성 실험에 있어 많은 비용의 대규모 압송실험(실제 규모와 동일한)을 수행하지 않고서도 배합의 유동성 및 압송가능성을 예측할 수 있게 함으로써 배합설계에 필요한 비용절감 및 현장 적용을 위한 콘크리트 배합설계의 효율성을 높일 수 있다. 또한 유동성에 있어 최대 인자로 간주되어온 Slip layer zone을 규명하고 최초로 이 Slip layer의 특성을 계측하여 정량적으로 분석을 시도, 이 부분에 있

어 선도적인 기술력을 확보하였다. 이를 수치해석 및 향후 테스트에 반영함으로써 콘크리트 유동성에 관한 연구 부분에 있어 새로운 접근을 할 수 있는 성과를 획득하였다. 이는 기존 해석 및 가정에 있어서 고려대상으로 되어 왔던 Slip layer의 물리적 차원을 분별함으로써 향후 이것이 유동성 평가에 있어 유효한 정보로 확인 될 수 있음을 확인하였고, 이를 판단하여 보다 정밀한 콘크리트 압송을 위한 물성 분석이 가능해졌다. 이 부분에 있어 새로운 연구 아이템을 도출 할 수 있었고, 이 부분에 대한 연구는 향후 콘크리트 압송을 위한 전 부분연구에 있어 기초가 될 수 있는 연구자료를 확보함으로써 다양한 물성 배합에 대한 해석적 접근이 가능한 방법적 연구성과를 도출하였다.

이러한 연구적 성과를 바탕으로 상사성 분석을 통해 Full-scale 압송을 위한 유동성평가가 가능해 졌으며, 이러한 기초 물성데이터를 바탕으로 콘크리트 압송시 압송 콘크리트의 물성 및 품질관리와 시공 관리를 위한 파라미터를 확보하였으며, 이를 통해 시공시 품질관리 모니터링 프로그램을 구성하였다.

본 연구에서는 Semi-scale의 규모를 통해 많은 배합설계에 대한 테스트를 통해 기존 연구보다 더 다양한 인자들을 실험에 반영할 수 있음으로 해서 더 효율적인 테스트 결과를 확보할 수 있었다.

이러한 테스트 데이터를 바탕으로 향후 Full-scale 테스트 시 보다 효율적인 실험설계가 가능하여 졌으며, 테스트 결과를 통해 대형구조물 시공시 콘크리트 압송을 위한 실험비용 절감 및 보다 엄밀한 데이터를 확보할 수 있게 되었다.

(2) 앵커리지 수화열 제어용 초저발열 콘크리트 개발 및 현장타설 기술 실용화

앵커리지 수화열 제어용 초저발열 콘크리트 개발 및 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 수화열을 낮추기 위하여 초저발열 결합재를 개발한 결과 최초에 계획을 세웠던 미소수화열 35cal/g 이하를 만족하는 결합재를 생산할 수 있었다.
- 초저발열 콘크리트를 개발하기 위하여 배합설계를 수행하고 개발한 결과 단열온도상승값 15℃(20MPa) 이하 만족하는 배합과 20℃(30MPa)이하를 만족하는 콘크리트를 개발 하였다.

- 앵커리지와 같은 매스콘크리트의 균열을 제어하고 평가하기 위하여 온도균열 저항성 정량평가 시스템을 구축하고 개발된 초저발열 결합재를 활용하여 콘크리트를 제조한 후 온도균열발생율을 평가한 결과 50% 이상 저감되는 것을 확인하였다.

(3) 해상기초 시공용 복합성능 콘크리트 개발 및 현장타설 기술 실용화

해상기초 시공용 복합성능 콘크리트 개발 및 현장 타설 프로세스 개발에 대한 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 현재 시판되고 있는 제품으로는 슬럼프 플로우 500mm 정도의 수중불분리 콘크리트 제조가 가능하고 이 연구에서 목표로 하는 수중슬럼프를로우 600mm 이상을 확보하기에는 다소 어려움이 있는 것으로 나타났다. 이에 이 연구에서는 수중불분리 콘크리트의 점성이 증가하면서도 고성능감수제를 첨가하여도 점성을 유지할 수 있는 고유동 수중불분리 혼화제 시제품인 <FLOWMIX HIGH WATER-CON>을 개발하였다.
- 이 연구에서 목표로 하는 고유동 수중불분리 혼화제 시제품을 사용하고 고로슬래그 미분말을 사용한 배합을 이용하여 압축강도 35MPa를 확보하면서 수중 슬럼프 플로우 630mm, 수중/기중 압축강도비 0.8이상, 현탁물질액 100mg/ℓ이하를 나타내는 고유동 수중불분리 콘크리트 최적배합을 개발하였고 이를 이용하여 해상 기초 구조물의 안정성 및 품질향상에 기여할 것으로 판단된다.
- 이 연구에서 개발한 수중불분리 혼화제 시제품과 최적배합을 기반으로 한 고유동 수중불분리 콘크리트를 (주)대우건설에서 추진하고 있는 압해-암태 1공구 새천년 대교 공사(사장교) RCD파일 구간에 Test-bed로 적용하였다. 이에 대한 경제성 비교를 한 결과 동일 압축강도를 확보하는 기존 수중불분리 콘크리트 재료비의 13% 절감효과 확인할 수 있었다.
- 대구경 현장타설말뚝 공법 해상기초로 적용되는 다양한 기초형식들 중 해상기초 현장 타설 프로세스에 대하여 살펴보았다. 특히, 해상에서 파일을 설치하기 위한 시공장비 구성과 조합에 대해 파악하였다. 향후 5차년도에서는 조사된 타설 프로세스를 바탕으로 해상기초 현장을 보다 효율적으로 운영할 수 있는 방안을 모색할 예정이다.

(4) 고기능성 콘크리트 성능규격 시스템 구축

본 성능규격 개발에 있어서는 고주탑 시공을 위한 고압송용 콘크리트, 앵커리지 시공을 위한 매스콘크리트, 해상기초 시공에 적합한 수중불분리성 콘크리트에 대한 지침을 구성하고자 하였으며, 본 연구를 통해 각 성능규격을 개발하는 연구 결과를 요약, 결론을 도출하면 다음과 같다.

- 고압송 콘크리트의 성능규격 개발

· 국내·외 기존 규격을 분석한 결과로써 펌프압송 공법에 대해 일본, 미국, 유럽의 주요 규격을 분석하였으며, 중국 등의 시공사례를 분석하였다. 일본의 경우 많은 실험을 통해 재료적인 규격을 비교적 상세하게 도출하였으며, 미국의 경우 주로 장비과 관련된 규격이 상세히 나타내고 있다. 그러나 펌프압송 높이에 따라 물성 및 고려대상이 달라질 수 있으므로, 고압송용 콘크리트 규격 개발이 필요한 것으로 판단된다.

· 국내·외 기존의 규격을 바탕으로 고압송용 콘크리트 성능규격의 구성을 마쳤으며, 각 내용에 대해 상세 분석을 실시하였다. 크게 재료부분과 장비부분으로 나누어 이를 국내·외 규격에 대한 내용으로 분석하여 결과를 도출하였다.

· 시멘트와 혼화재료는 기존의 KS 규격에 적합한 것을 사용하는 것을 권장하지만, 펌프 압송전·후의 물성 및 균질성, 압송성 등을 고려하여 재료를 사용하여야 한다.

· 굵은 골재는 10~40mm의 범위에서 사용할 수 있으며 본 연구단에서 사용하고자 하는 25mm 굵은골재의 경우 조립률이 2.4~2.5 범위가 되도록 하는 것이 적합할 것으로 판단된다.

· 펌프압송용 콘크리트에서 미립분은 물과 함께 윤활제 역할을 하며 약 35%이하를 포함하는 것이 적합할 것으로 판단된다.

· 기존의 국내·외 규격은 슬럼프 값에 대한 규정이 되어있으나, 400m 이상의 고압송 콘크리트에 있어서는 슬럼프 플로우 값을 설정하여야 할 것으로 판단된다.

- 매스콘크리트의 성능규격 개발

· 현수교 앵커리지 시공 등을 위해서는 고성능 매스콘크리트 시공이 필요한 실정이므로 기존의 설계 및 시공 지침에서의 중요사항 상세 비교 분석하였다.

국내의 현행 매스콘크리트 관련 시공지침과 외국 시공지침에서의 단열온도상승곡선 비교결과는 다소 차이를 나타낸다. 또한, 콘크리트의 종류에 따른 단열온도상승곡선 예측결과도 차이를 나타낸다.

· 비교분석 내용 및 앵커리지용 초저발열 콘크리트에 대한 단열온도상승 실험결과를 토대로 초장대교량 적용을 위한 고성능 매스콘크리트 시공지침(안)을 작성하였으며, 시공지침을 테스트-베드에 적용할 예정이다.

- 수중불분리성 콘크리트의 성능규격 개발

· 공기단축형 콘크리트 기술개발을 위한 수중불분리성 콘크리트 지침안은 일반 수중불분리성 지침서와 고유동 수중불분리성 콘크리트 기술 개선으로 연구내용을 공공기관을 통한 검수 및 보완을 통해 지침서 활용화를 위한 연구를 수행하였다.

· 수중불분리성 콘크리트에 대한 품질관리, 재료특성, 성능규정, 최적배합, 공법비교, 배합, 운반 및 타설 등의 지침(안)을 조사 자료에 근거하여 작성하였다.

· 향후 보완된 실내시험 결과를 내용 분석과 함께 규격에 반영하여야 하며, 시험시공을 통한 결과를 반영할 예정이다.

2. 장경간 강상판 케이블교량용 박층포장재료 및 이용기술 개발

가. 초장대교량용 박층교면포장재료 개발

(1) 박층교면포장재료

(가) 폴리머콘크리트 계열

① 아크릴 수지 계열(김대영 외, 2010)

㉮ 정의

통상 플라스틱 분야에서 아크릴 수지로 불리는 메타크릴산 메틸을 주성분으로 하는 모노머류를 중합시켜 얻어지는 메타크릴산 수지를 아크릴수지라고 지칭하는 경우가 많지만, 도료 분야에 있어서 바인더로의 아크릴수지는 Acryl산, Methacryl산 유도체를 주성분으로 하는 모노머를 공중합시켜 얻어지는 수지를 말한다. 따라서 Acrylic resin에는 메타크릴산에스테르 또는 아크릴산에스테르의 중합체가 있다. 수지 재료로서는 메타크릴산메틸어스테르가 가장 실용성이 높다.

㉯ 화학 구조

메타크릴산메틸 수지의 반응은 다음과 같은 화학 구조에 따라 이루어진다.

```
        C H3                          H   CH3
         l                  중합       l    l
n. H2C=C                    -------->--C - C-------
         l                             l    l     n
        COOCH3                        H    COOCH3
```

(메타크릴산메틸;MMA)　　(폴리메타크릴산메틸중합체;PMMA)

메타크릴산케틸에스테르 또는 아크릴산에스테르에 과산화물 촉매를 가하여 80~95℃에서 중합시킨다. 중합법에는 괴상중합, 용액중합, 에멀션화 중합, 입상중합이 있다. 메타크릴산에스테르, 아크릴산에스테르에는 메틸에스테르 외에 에틸에스테르 n-프로필, 이소프로필, 부틸에스테르 등 많은 종류가 있다. 공업재료의 응용에는 성형재료로서 메타크릴산메틸에스테르가 가장 많이 사용되고, 아크릴산메틸수지, 아크릴산부틸수지 등은 다른 수지에 혼합되어 내충격성이 개량된다.

② 우레탄 수지 계열(PU)

㉮ 정의

Polyurethane 또는 Urethane polymer라고 총칭되는 Polymer는 분자구조내에 우레탄결합을 가지고 있는 고분자화합물로서 폴리올과 이소시아네이트를 주재로 하여 발포제, 촉매제, 정포제, 기능성 첨가제 등을 혼합 반응시켜 얻어지는 발포 생성물이다. 종류로는 경질, 반경질, 연질 등으로 나누어지며, 플라스틱 및 고무 대체품목으로서 산업 전 분야에 널리 사용되고 있다. 일반적으로 Urethane기는 다른 구조 단위에 비해 오히려 소량이고 Urethane기 이외 부분의 구조는 다종 다양하다. 이 구조의 다양성 때문에 Urethane polymer의 성질도 다양하며, 이것이 광범위한 응용을 가능하게 하며 Polyurethane의 구조물성 관계를 복잡하게 하고 있다.

㉯ 화학 구조

폴리우레탄 수지의 반응은 다음과 같은 순서 및 화학구조에 따라 이루어진다.

- Urethane결합 생성 -OH + -NCO → -OCONH-
- Urea 결합 생성 -NCO + -NH2 → -NHCONH-
  -NCO + H2O → -NHCONH + CO2
- Allophanate 결합 생성 -OCONH- + OCN- → CO NH-
  N COO-
- Biuret 결합 생성 -NHCONH- + OCN- → NHCON
  CONH-

㉰ 재료 특성

우레탄 수지를 활용한 재료는 인장강도가 우수하며, 내약품성, 내마모성이 우수하다. 또한 가소제 사용없이 1액형은 원료 변화에 의해, 2액형은 경화제 첨가량 변화에 의해 Softness 변화가 가능한 장점이 있다.

(나) 아스팔트콘크리트 계열

① 에폭시아스팔트(김병헌, 2011)

㉮ 정의

에폭시 아스팔트는 일반 아스팔트를 에폭시를 이용해서 처리한 열경화성 바인더와 골재를 섞은 혼합물이다. 근본적으로 아스팔트의 열가소성을 바꾸고 아스팔트에 새롭고 우수한 물리역학 특성을 갖게 한다. 에폭시 아스팔트용 수지의 주제는 비스페놀(Bisphenol)-A와 에피클로로히드린(Epichlorohydrine)과 에폭시화 반응에 의하여 생성된 분자량 300～1,500이고, 분자구조내 에폭사이드기가 2개 이상인 디글리시딜 에테르(Diglycidry ether) 비스페놀-A형 에폭시 수지, 분자량 500～2,000이고, 분자구조 내 에폭사이드기가 2.2개 이상인 페놀노볼락 폴리글리시딜 에테르(Phenol novolac polyglycidry ether)에폭시 수지 등을 주제로 하고 폴리아민을 경화제로 하는 에폭시 수지이다. 에폭시 아스팔트 혼합물은 일반적인 아스팔트 플랜트를 약간 개조한 플랜트를 이용해서 혼합한다. 일반 아스팔트 혼합물의 혼합시간이 1분 정도임에 비하여 에폭시 혼합물의 혼합에는 3분 정도가 소요된다. 혼합물이 완전하게 양생되는 데는 약 30～60일 정도 소요되지만 전압 후 1시간 이내에 차량의 통행이 가능할 만큼의 강도가 발휘된다(정두희, 2000).

㉯ 재료 특성

에폭시 아스팔트 혼합물 포장층의 주요 장점은 강도가 높고 강성이 큰 것이다. 일반 아스팔트 혼합물의 마샬안정도는 8～10KN 밖에 되지 않지만 에폭시 아스팔트의 마샬안 정도는 이보다 4～5배 큰 45KN을 초과한다(이광호 외, 2009). 고온 시 소성과 영구변형력에 대해 강하고, 내저온균열성이 양호하다. 에폭시 아스팔트는 강도가 높아 동일 응력에서 보통 아스팔트보다 수명이 10～30배 길다. 에폭시 아스팔트는 또한 내화학성(연료와 유류 침식 포함)이 높다. 반면, 단점은 주로 에폭시 아스팔트 혼합물의 배합공정이 비교적 복잡하고 시공 중 시간과 온도에 대한 요구가 매우 엄격하고 시공 난이도가 크고 에폭시 아스팔트 가격이 높고 관련 기술이 대부분 국외 특허 제품이다.

㉰ 에폭시 아스팔트 포장재료의 장단점 및 특징

에폭시 아스팔트는 일반 아스팔트를 에폭시를 이용해서 처리한 열경화성 바인

더와 골재를 섞은 혼합물이다. 기본적으로 아스팔트의 열가소성을 바꾸고 아스팔트에 새롭고 우수한 물리역학 특성을 갖게 한다. 강성을 현저히 증가시킨 에폭시 아스팔트를 교량에 사용 할 경우, 일반 아스팔트 포장보다 얇은 두께로 시공이 가능하므로 교량 자체의 하중을 현저히 줄일 수 있고, 소성변형, 피로 균열에 대하여 일반 아스팔트 포장에 비해 큰 저항성을 가진다. 현재 일본, 미국, 중국 등 여러 나라에서 활발히 연구 및 적용되고 있으나 우리나라에서는 아직 도입 초기단계이다.

에폭시 아스팔트 혼합물의 주요 장점은 강도가 높고 강성이 큰 것이다. 또한 고온에서 소성과 영구변형력에 강하고 내저온균열성이 양호하다. 반면, 단점은 에폭시 아스팔트 혼합물의 배합공정이 비교적 복잡하고 시공 중 시간과 온도에 대한 요구가 매우 엄격하다. 또한 시공 난이도가 크고 에폭시 아스팔트 가격이 높으며 관련 기술이 대부분 국외 특허 제품이다(김병헌, 2011). 최근 이순신대교에 적용한 에폭시 아스팔트의 조기파손의 경우 다양한 현장 여건 및 이러한 시공관리의 어려움 및 품질 변동성에 기인한 것으로 판단된다.

◇ 개질매스틱 아스팔트 포장과 에폭시 아스팔트 포장과의 차이점 비교

	개질매스틱+ PSMA	에폭시 아스팔트
포장단면		
내구성	• 수명 약 20년 내외 • PSMA 적용으로 소성변형 저항성 우수 • 개질매스틱 적용으로 방수성능 우수	• 수명 약 15년 내외 • 완벽한 방수 불가능 • **품질의 변동이 커 하자발생 가능성이 높음**
시공성	• 특수 포설장비 필요 • 상판의 열영향 고려해야 함 • 표층 시공시 다짐이 필요 • 기존 강상판 교면포장 시공과 유사한 과정으로 시공	• **품질관리가 상당히 어려움** • 포장 시공시 다짐이 필요 • 품질관리에 따른 포장 수명의 변동이 큼
기능성	• 미끄럼 저항성 우수 • 주행성 우수	• 미끄럼 저항성 불리 • 주행성 양호

② 매스틱아스팔트

㉮ 정의

매스틱 아스팔트(Mastic asphalt concrete)는 기존 구스 아스팔트(Guss asphalt concrete)와 유사한 형태의 포장재료로 볼 수 있으나, 차이점은 구스 아스팔트 배합에 사용되는 TLA라고 하는 고가의 천연아스팔트 재료 대신에 폴리머와 같은 개질제 및 유동제를 첨가하여 물성을 개선한 것이다. 주로 높은 공용성 등급의 아스팔트를 주원료로 사용하여 동적안정도가 약 2,500~3,000회/mm로 소성변형 저항성능이 우수하다(이경하, 1999).

㉯ 재료 특성

매스틱 아스팔트 재료는 기본적으로 공극이 거의 없어 불투수성으로 수분이나 염분 침투로 인한 교량 구조물 열화를 사전에 차단할 수 있다. 시공시 혼합물 자체의 유동성 및 거동으로 다짐이 불필요하며 내구성이 뛰어나고, 휨추종성 및 내충격성 등의 물리적 특성이 우수하다. 또한 부착성능이 뛰어나 강바닥판 뿐만 아니라 콘크리트 교면상판과 같은 이질재에 대한 부착력이 탁월하다.

(다) 시멘트콘크리트 계열

① 고인성 섬유보강 콘크리트(국토해양부, 2009)

㉮ 정의

고인성 섬유보강 콘크리트(Ductile Fiber Reinforced Cementious Composite, 이하 DFRCC)는 일반적으로 시멘트계의 재료가 갖는 가장 취약한 인장 거동에 대하여 인장강도 및 연성이 증가된 시멘트계 복합재료를 의미한다. 일반 콘크리트 재료와의 가장 큰 차이점은 굵은 골재가 포함되지 않은 모르타르 상태에서 PVA 섬유를 혼합하여 만들어진다.

㉯ 재료 특성

DFRCC는 폴리비닐알콜(PVA)섬유 또는 강섬유(Steel fiber)를 첨가하여 인성(Ductility)을 향상시켜 휨, 인장, 압축파괴시 유사변형경화(Pseudo strain hardening)

와 다수의 균열(Multiple cracking)이 발생(고경택, 2006)하여 취성파괴가 일어나

지 않게 한 포장재료이다. DFRCC는 일정 수준 이상의 하중에서 미세균열이 발생하고(50~80μm), 이 미세균열이 재료의 파괴와 연결되는 균열로 진전되는 것이 아니라 보강섬유의 Bridging effect에 의해 다른 부분에서 새로운 미세균열이 발생하는 메카니즘을 가지고 있다. 이러한 일련의 과정이 연속적으로 반복되면서 합성재료에 전체적으로 미세균열이 확산되어 외부 하중을 지속적으로 지지해 줄 수 있는 기능을 하게 된다.

② 폴리머 개질 콘크리트(PMC)

㉮ 정의

폴리머 개질 콘크리트(Polymer Modified Concrete, 이하 PMC)는 일반 콘크리트 배합에 폴리비닐아세테이트(Poly Vinyl Acetate, PVAC)를 첨가하여 물성을 개량한 포장재료이다. 폴리비닐아세테이트가 물, 시멘트 및 모래와 혼합되어 모르타르가 만들어지면, 시멘트에 작용하여 가교 화학반응을 통한 강한 접착성을 제공하게 되는 결과를 가져온다(최창렬, 2011).

㉯ 재료 특성

폴리머 개질 콘크리트의 특징은, 폴리비닐아세테이트가 물, 시멘트 및 모래와 혼합되어 모르타르가 만들어지면, 뛰어난 접착력, 탄성력, 염소성분 저항성, 부착강도, 방수성 등의 포장재로서의 우수한 성능을 나타낸다. 또한 콘크리트, 석재, 목재, 철물, PVC, 아스팔트 등 모든 견고한 물질의 표면에 영구적으로 부착되는 우수한 성질을 가지고 있다. 그리고, 염소 이온 저항성, 다시 유화되지 않는 특성 및 안전한 무기물로서 친환경적인 효능을 제공할 수 있다.

(2) 물성시험

(가) 폴리머콘크리트 계열

본 연구에서는 폴리머콘크리트 계열 박층포장재료인 MMA와 PU(일반 : PUa, 초속경 : PUb)에 대하여 저온휨시험(ASTM C 580-02), 인장강도시험(ASTM D 638-08), 부착강도시험(KS F 4042), 선수축률 및 열팽창계수시험(ASTM

C531-00)을 실시하여 물성을 평가하였다.

① 저온휨시험

PUb의 휨강도가 29.44MPa로 MMA의 21.67MPa과 PUa의 23.51MPa 보다 높게 나타났으며, PUb의 변형률이 0.0265%로 MMA의 0.0077%와 PUa의 0.0087% 보다 상당히 높게 나타났다. 선행된 연구(김현준, 2002)를 통해서 확인한 최대입경 13mm PSMA(강바닥판 교면포장공법으로 표층에 적용)의 휨강도가 9.89MPa이고 변형률이 0.041%인 것을 감안하면 폴리머콘크리트 계열의 박층포장재료는 휨응력에 대한 저항성은 매우 우수한 것으로 판단되나 휨에 대한 추종성 및 적응성은 PSMA 보다 불량한 것으로 판단된다.

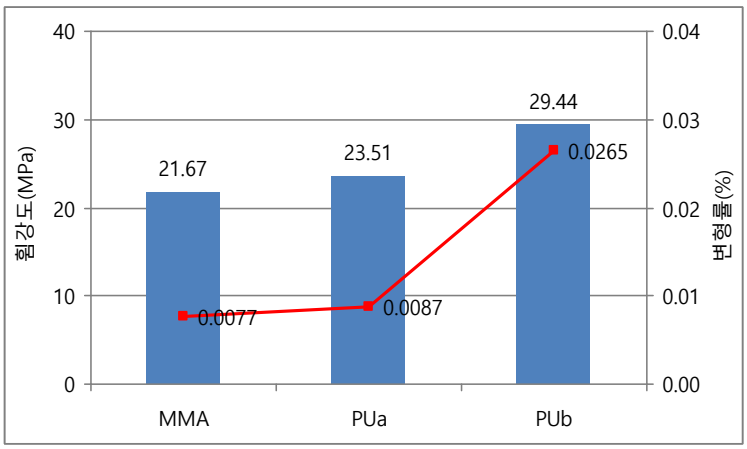


그림 3-2-2-1. 폴리머콘크리트의 휨강도 및 변형률 비교

② 인장강도시험

MMA의 인장강도는 7.32MPa로 PUa의 4.30MPa과 PUb의 4.13MPa 보다 높게 나타났으며, PUa의 신장률이 11.50%로 MMA의 2.80%와 PUb의 9.37% 보다 높게 나타났다. MMA의 인장강도는 PU에 비하여 상당이 우수하나 신장률이 상당히 낮기 때문에 포장층의 인력응력이 인장강도를 초과할 경우 취성파괴가 발생할 가능성이 있다.

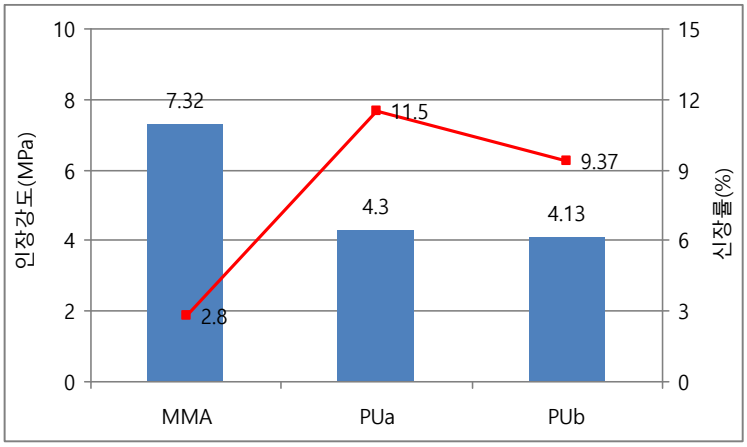


그림 3-2-2-2. 폴리머콘크리트의 인장강도 및 신장률 비교

③ 부착강도시험

MMA의 부착강도는 5.49MPa로 PUa의 2.89MPa과 PUb의 2.65MPa 보다 높게 나타났다. 선행된 연구(박희영, 2006)를 통해서 확인한 구스아스팔트(강바닥판 교면포장공법으로 하층에 적용)의 부착강도가 3.13MPa인 것을 감안하면 MMA의 부착성능은 상당히 우수한 것으로 판단되며, PU의 부착성능은 구스아스팔트의 부착강도와 유사한 것으로 확인되었다.

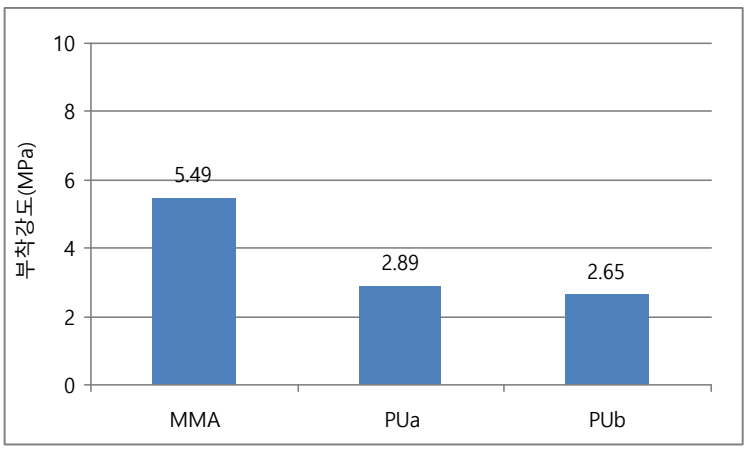


그림 3-2-2-3. 폴리머콘크리트의 부착강도 비교

④ 선수축률 및 열팽창계수시험

MMA의 선수축률이 0.246%로 PUa의 0.124%와 PUb의 0.105% 보다 높게 나타나 양생중에 건조수축으로 인한 응력이 크게 발생할 것으로 판단된다. 열팽창계수는 MMA가 0.94E-04mm/mm/℃, PUa가 1.08E-04mm/mm/℃, PUb가 1.12E-04mm/mm/℃로 나타나 일반적인 강바닥판의 선팽창계수가 1.2E-06mm/mm/℃인 것을 감안하면 온도변화에 따라 수축팽창으로 인한 응력이 발생할 것으로 판단된다.

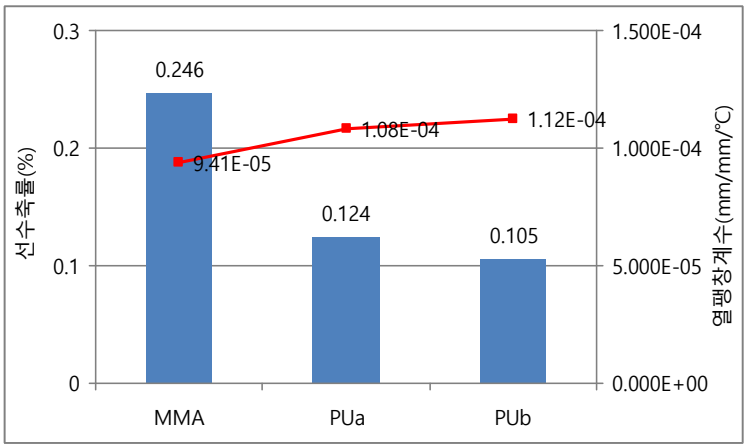


그림 3-2-2-4. 폴리머콘크리트의 선수축률 및 열팽창계수 비교

(나) 아스팔트콘크리트 계열

① 에폭시아스팔트

본 연구에서는 아스팔트콘크리트 계열 박층포장재료인 에폭시아스팔트에 대하여 저온휨시험(ASTM C 580-02), 휠트래킹시험(KS F 2374), 부착강도시험(KS F 4042), 열팽창계수시험(ASTM C531-00), 수분손상시험(ASTM D4867-92)을 실시하여 물성을 평가하였다.

㉮ 저온휨시험

에폭시아스팔트의 휨강도는 17.61MPa로 나타났으며, 변형률은 0.0036%으로 나타났다. 선행된 연구(김현준, 2002)를 통해서 확인한 최대입경 13mm PSMA(강바닥판 교면포장공법으로 표층에 적용)의 휨강도가 9.89MPa이고 변형률이 0.041%인 것을 감안하면 폴리머콘크리트 계열의 박층포장재료는 휨응력에 대한

저항성은 매우 우수한 것으로 판단되나 휨에 대한 추종성 및 적응성은 PSMA 보다 불량한 것으로 판단된다.

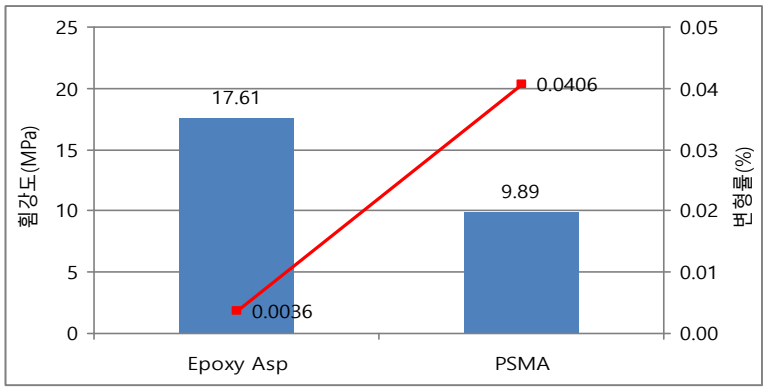


그림 3-2-2-5. 에폭시아스팔트의 휨강도 및 변형률 비교

㉯ 휠트래킹시험

에폭시아스팔트의 동적안정도(Dynamic stability)는 172,676회/mm로 나타났다. 선행된 연구(김현준, 2002)를 통해서 확인한 최대입경 13mm PSMA의 동적안정도가 9000회/mm인 것을 감안하면 에폭시아스팔트의 소성변형 저항성은 매우 우수한 것으로 판단된다.

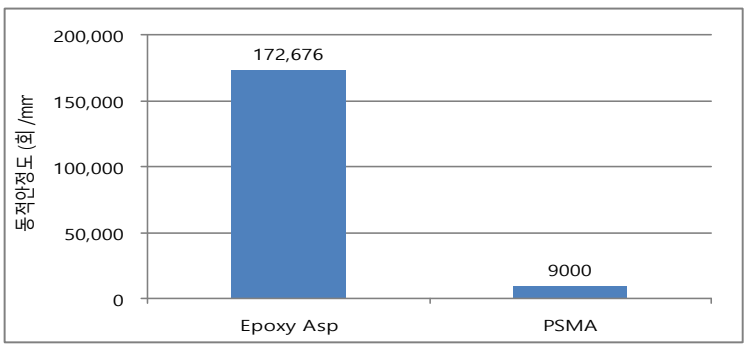


그림 3-2-2-6. 에폭시아스팔트의 동적안정도 비교

㉰ 부착강도시험

에폭시아스팔트의 부착강도는 2.0MPa로 나타났다. 선행된 연구(박희영, 2006)를 통해서 확인한 구스아스팔트(강바닥판 교면포장공법으로 하층에 적용)의 부착강도가 3.13MPa인 것을 감안하면 에폭시아스팔트의 부착성능은 구스아스팔트

의 경우보다 다소 불량한 것으로 판단된다.

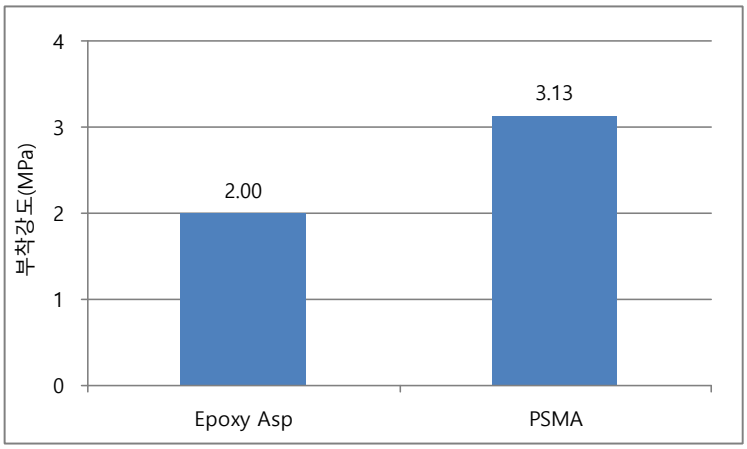


그림 3-2-2-7. 에폭시아스팔트의 부착강도 비교

㉱ 수분손상시험

아스팔트 혼합물의 수분손상 저항성은 간접인장강도비율(TSR)이 높을수록 유리하며 미국의 경우 일반적으로 75~80% 이상이 되도록 규정하고 있다. 본 연구에서 에폭시 아스팔트의 TSR은 56.6%로 나타나 이러한 규정에 만족하지 못하는 것으로 확인되었다. 선행된 연구(김현준, 2002)를 통해서 확인한 최대입경 13mm PSMA의 TSR이 89.40%인 것을 감안하면 에폭시아스팔트의 수분손상에 대한 저항성은 상당히 불량한 것으로 판단된다.

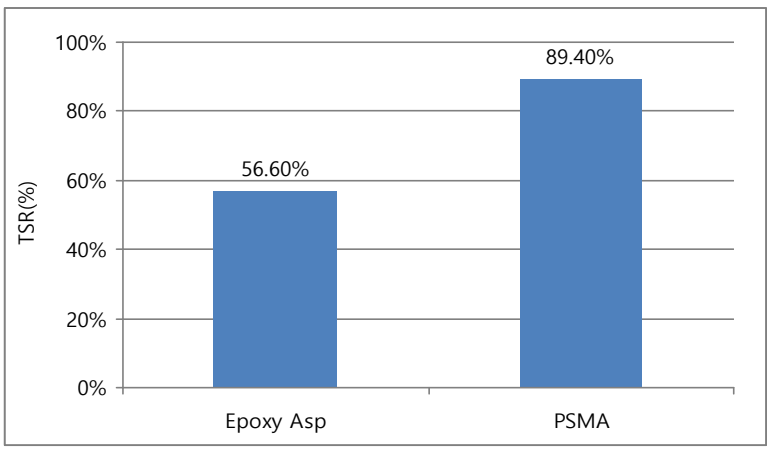


그림 3-2-2-8. 에폭시아스팔트의 간접인장강도비율 비교

㈐ 열팽창계수시험

에폭시아스팔트의 열팽창계수는 5.24E-05로 PU의 평균인 1.1E-04mm/mm/℃보다 상당히 낮은 것으로 나타났으나 일반적으로 강바닥판의 선팽창계수가 1.2E-06mm/mm/℃인 것을 감안하면 온도변화에 따라 수축팽창으로 인한 응력이 PU보다 크게 발생할 것으로 판단된다.

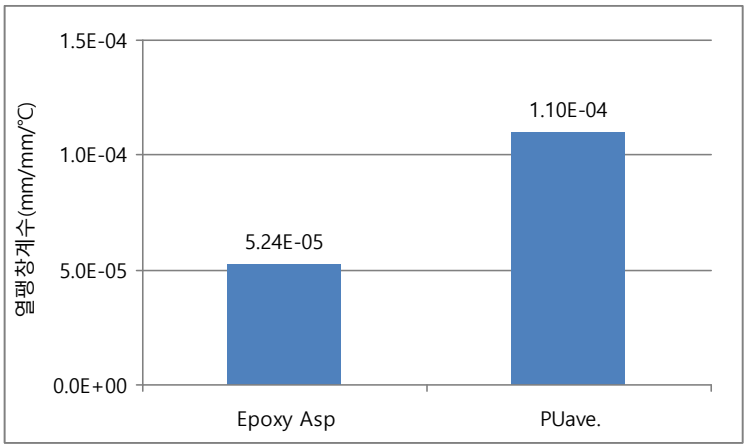


그림 3-2-2-9. 에폭시아스팔트의 열팽창계수 비교

② 매스틱아스팔트

본 연구에서는 아스팔트콘크리트 계열 박층포장재료인 매스틱아스팔트에 대하여 관입량시험(혼슈-시코쿠 연락교 교면포장기준), 유동성시험(혼슈-시코쿠 연락교 교면포장기준), 휠트래킹시험(KS F 2374)을 실시하여 물성을 평가하였다.

㉮ 관입량시험

매스틱아스팔트의 관입량은 아스팔트바인더 함량 7.0%에서 1.06mm, 7.5%에서 1.77mm, 8.0%에서 2.26mm, 8.5%에서 3.45mm로 혼슈-시코쿠 연락교 교면포장기준에서 제시하고 있는 구스아스팔트 혼합물의 관입량 기준인 1~4mm를 만족하는 것으로 나타났다.

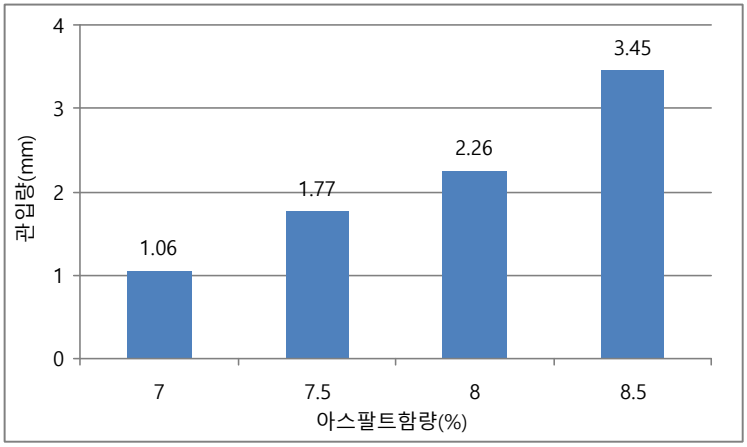


그림 3-2-2-10. 매스틱아스팔트의 관입량 비교

㉯ 유동성시험

매스틱아스팔트의 유동성은 아스팔트바인더 함량 8.0%에서 17초, 8.5%에서 7sec로 혼슈-시코쿠 연락교 교면포장기준에서 제시하고 있는 구스아스팔트 혼합물의 유동성 기준인 20초 이하를 만족하는 것으로 나타났다.

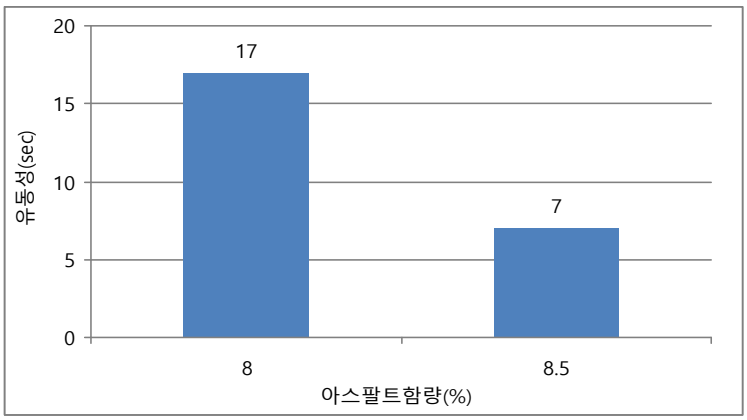


그림 3-2-2-11. 매스틱아스팔트의 유동성 비교

㉰ 휠트래킹시험

매스틱아스팔트의 동적안정도는 아스팔트바인더 함량 8.0%에서 351회/mm, 8.5%에서 317회/mm로 혼슈-시코쿠 연락교 교면포장기준에서 제시하고 있는 구스아스팔트 혼합물의 동적안정도 기준인 300회/mm 이상을 만족하는 것으로 나타났다.

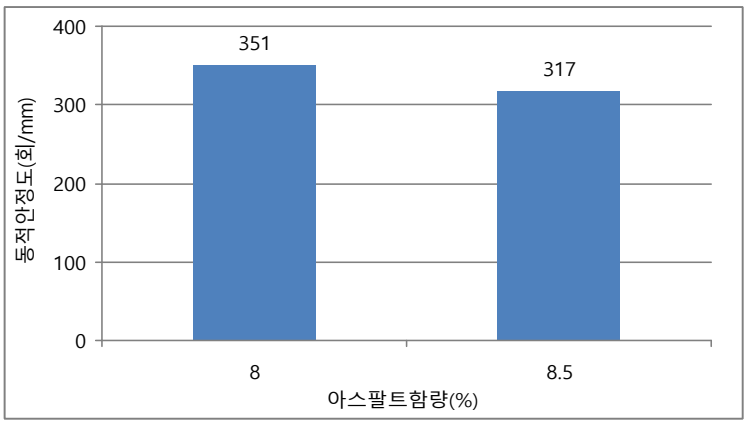


그림 3-2-2-12. 매스틱아스팔트의 동적안정도 비교

(다) 시멘트콘크리트 계열

본 연구에서는 시멘트콘크리트 계열 박층포장재료인 DFRCC와 PMC에 대하여 휨강도시험(KS F 2408), 압축강도시험(KS F 2405), 부착강도시험(KS F 4042), 건조수축시험(KS F 2424)을 실시하여 물성을 평가하였다.

① 휨강도시험

휨강도 시험결과, DFRCC의 휨강도는 10.06MPa로 PMC의 5.55MPa와 일반 콘크리트 모르타르의 2.98MPa 보다 높게 나타났다. 시멘트콘크리트 계열 교면포장재료의 휨강도 품질기준이 4.5MPa이상인 것을 감안하면 DFRCC의 휨에 대한 저항성이 상당히 우수한 것으로 판단된다. 특히, DFRCC의 변형률은 일반적으로 시멘트콘크리트에서 발생하는 파괴현상과 다르게 휨응력이 휨강도를 초과할 경우 다수의 균열이 발생하면서 강도가 계속 증가하는 변형률 경화 현상이 발생(2006, 고경택)하여 취성파괴가 일어나지 않는 것으로 판단된다.

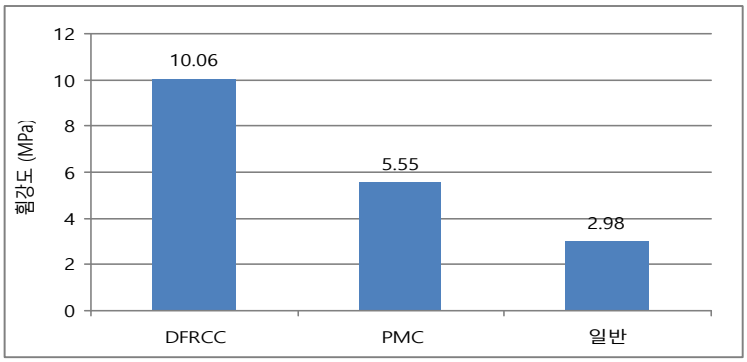


그림 3-2-2-13. 보강콘크리트의 휨강도 비교

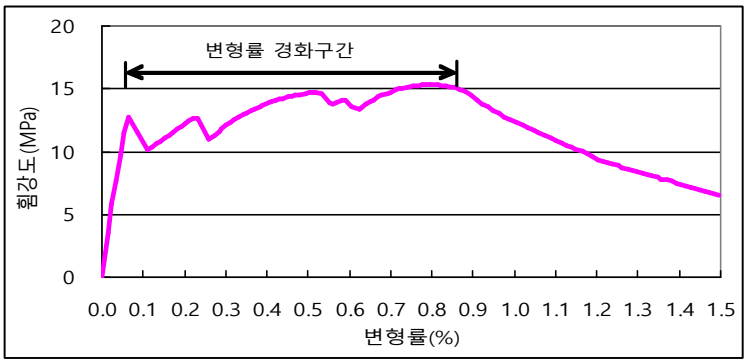


그림 3-2-2-14. DFRCC의 휨강도-변형률 그래프

② 압축강도시험

DFRCC의 압축강도가 85.76MPa로 PMC의 22.59MPa 보다 높게 나타났으며, 시멘트콘크리트 계열 교면포장재료의 압축강도 품질기준이 26.5MPa이상인 것을 감안하면 DFRCC의 압축에 대한 저항성이 상당히 우수한 것으로 판단된다. 이는 일반적으로 포장재료가 압축을 받으면 취약부에서 인장이 발생하여 파손이 시작되기 때문에 DFRCC에 첨가된 PVA섬유로 인해서 인장성능과 압축성능이 향상된 것으로 판단된다.

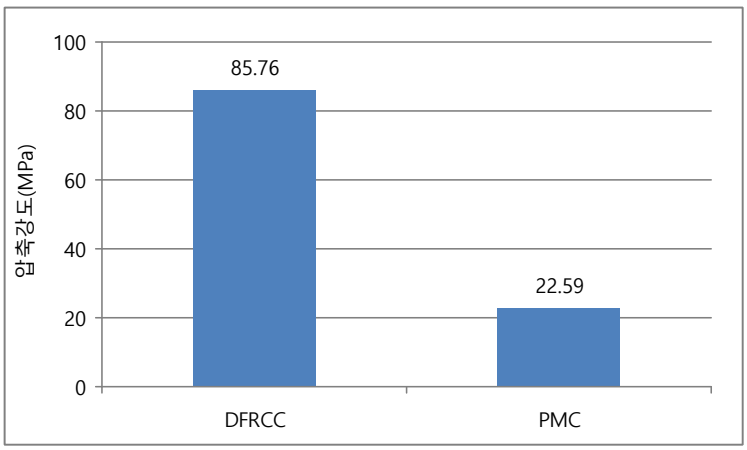


그림 3-2-2-15. 보강콘크리트의 압축강도 비교

③ 부착강도시험

PMC의 부착강도가 0.45MPa로 DFRCC의 0.26MPa 보다 높게 나타났으나 선행된 연구(박희영, 2006)를 통해서 확인한 구스아스팔트의 부착강도가 3.13MPa인 것을 감안하면 시멘트콘크리트 계열 박층포장재료의 부착성능은 구스아스팔트의 경우보다 매우 불량한 것으로 판단되어 강바닥판과 포장층의 전단력을 향상시킬 수 있는 부착층을 추가적으로 형성해야 할 것으로 사료된다.

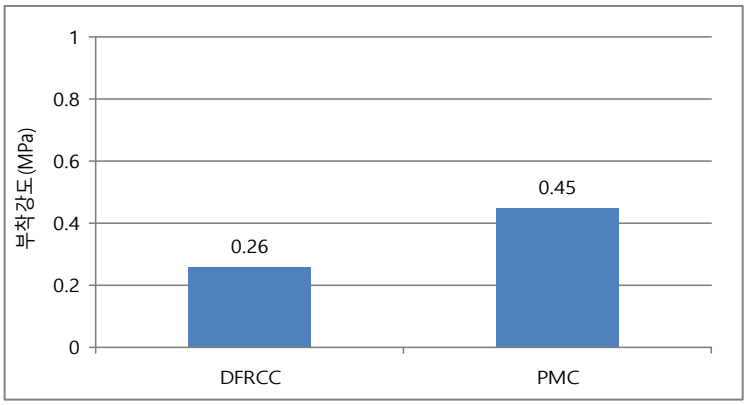


그림 3-2-2-16. 보강콘크리트의 부착강도 비교

④ 건조수축시험

DFRCC의 건조수축률이 6.97E-04로 PMC의 1.97E-04 보다 상당히 높게 나타난 것으로 보아 양생중에 건조수축으로 인한 응력이 크게 발생할 것으로 판단된다.

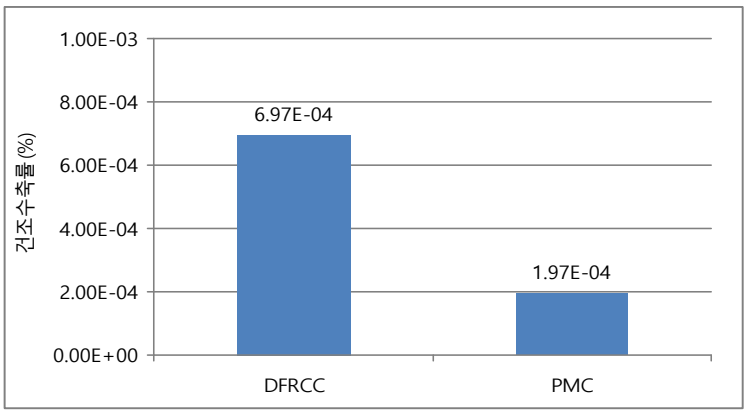


그림 3-2-2-17. 보강콘크리트의 건조수축률 비교

(라) 박층포장 후보재료 선정

본 연구에서는 강바닥판 박층교면포장으로 적합한 포장재료를 1차적으로 선별하기 위해 다양한 실내 물성시험을 수행하였다. 또한 옥외 폭로시험을 수행하여 포장재료의 시공성능을 간접적으로 평가하였으며 초기 시공비 및 유지보수비용을 감안하여 기본적인 시공비용을 비교해 보았다.

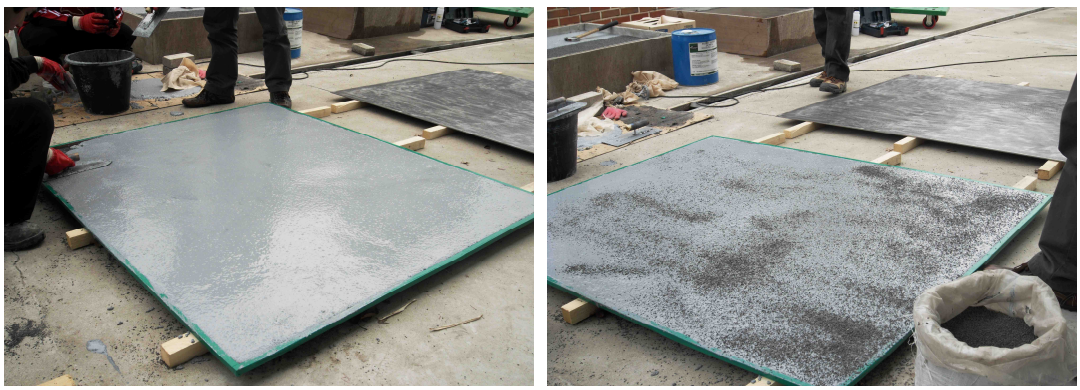


그림 3-2-2-18. 박층포장재료의 옥외폭로시험 전경

표 3-2-2-1 물성시험, 시공성, 경제성 비교를 통한 박층포장재료 1차 선정

구분	폴리머콘크리트			아스팔트콘크리트		시멘트콘크리트	
	PUa	PUb	MMA	에폭시 아스팔트	매스틱 아스팔트	DFRCC	PMC
물성시험	◎	○	◎	△	○	○	X
시공성	◎	○	X	○	○	△	△
경제성	○	○	◎	○	◎	◎	◎
최종선정	○	○	X	X	○	○	X

MMA의 경우 물성시험 결과는 대부분 우수하였으나 포장부의 피로균열 발생 주요 인자인 인장변형에 대한 신장률이 PU보다 낮아 균열이 발생할 위험이 있으며, 옥외폭로시험으로 측정한 가사시간(재료배합 후 칩핑하기 전까지)이 약 15분(대기온도 8.7℃)으로 시공성에 한계가 있어 강바닥판 박층교면포장으로 활용하기에 부적합한 것으로 판단된다.

에폭시아스팔트의 경우 일반아스팔트에 비해 물성이 매우 향상되었으나 수분손상저항성이 취약하여 향후 공용기간동안 포트홀이나 기타 손상이 발생할 가능성이 높아 강바닥판 박층교면포장으로 활용하기에 부적합한 것으로 판단된다. 실제로 에폭시 아스팔트가 활발히 시공된 중국의 경우 시공 초기에 다수의 균열 및 포트홀에 의한 파손 사례(중국 강소성 강음대교, 저장성 항주만대교 등)가 보고되어 향후 품질관리를 통한 개선이 이루어져야 할 것으로 사료된다.



그림 3-2-2-19. 에폭시아스팔트의 수분손상에 의한 포트홀(좌)과 균열(우)

PMC의 경우 DFRCC에 비해서 휨강도, 압축강도 측면에서 공용성능이 취약하여 강바닥판 박층교면포장으로 활용하기에 부적합한 것으로 판단된다.

(마) 시험방법

① 동결융해시험

온도변화에 따른 재료의 저항성을 평가하기 위한 동결융해저항성시험은 시험체를 급속(2~4시간)으로 반복(100~300싸이클) 동결융해(4℃, -18℃)하여 노출전후의 압축강도, 휨강도, 인장강도, 탄성계수를 측정하고 비교하여 재료의 내구성을 평가한다. 본 연구에서는 시험체의 1회 노출 변화시간을 4시간으로, 반복횟수를 300싸이클로 설정하여 시험을 실시하였다.



그림 3-2-2-20. 동결융해 시험기 전경

② 촉진내후성시험

태양광에서 발생하는 자외선에 따른 재료의 저항성을 평가하기 위한 촉진내후성시험은 시험체를 광원(제논-아크 광원, 자외선 형과 램프, 개방 불꽃 카본-아크램프 및 자외선 카본-아크 램프)에 의하여 노출하거나 직접 옥외에서 창유리를 투과한 태양광을 300시간 노출하여 노출전후의 압축강도, 휨강도, 인장강도, 탄성계수를 측정하고 비교하여 재료의 내구성을 평가한다.

본 연구에서는 다양한 광원중에서 선샤인 카본 아크 램프(개방 불꽃 카본-아크 램프)를 이용하여 시험체를 300시간 노출하여 시험을 실시하였다.



그림 3-2-2-21. 션사인 카본 시험기 전경

③ 염소이온 침투저항성시험

강우, 강설, 그리고 융설재 등에 따른 재료의 저항성을 평가하기 위한 염소이온 침투저항성시험은 확산 셀 장치를 이용하여 염소이온농도의 변화를 측정하는 방식과 NaCl 용액이나 해수에 시험체를 침지시켜 염소이온의 농도분포를 측정하는 방식이 있으나 장시간의 시험기간이 소요되는 문제점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 전기적인 촉진방식으로 통과전하량을 측정하여 재료의 저항성을 단시간 내에 평가할 수 있는 염소이온 침투저항성시험을 실시하였다.

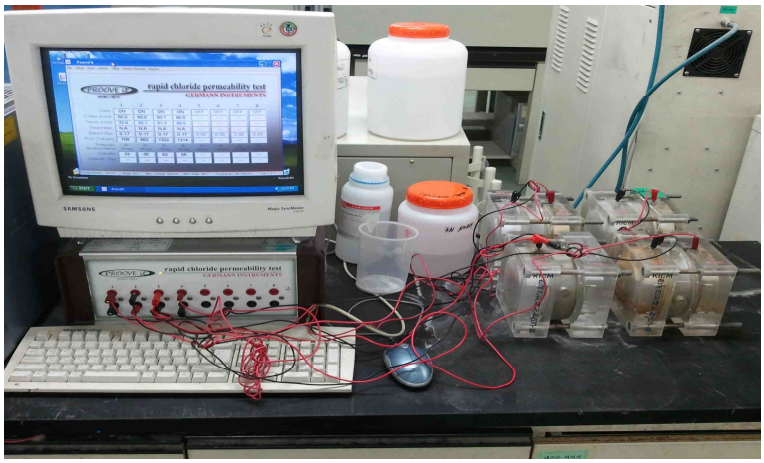


그림 3-2-2-22. 염소이온 침투 저항성시험 전경

(바) 시험결과

PUa의 시험전 휨강도는 5.9MPa이며 동결융해시험 및 촉진내후성시험 후 휨강도의 변화가 없는 것으로 나타났으며, PUb의 시험 전 휨강도는 4.7MPa이며 동결융해시험 및 촉진내후성시험 후의 휨강도가 변화가 거의 없는 것으로 나타나 휨강도 측면에서 충분한 내구성을 확보하고 있는 것으로 나타났다.

PUa의 시험 전 인장강도는 2.1MPa이며 동결융해시험 후 1.8MPa, 촉진내후성시험 후 1.7MPa로 다소 감소하는 것으로 나타났으나 그 변화는 미미하여 내구성에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 판단된다. PUb의 시험 전 인장강도는 2.0MPa이며 동결융해시험 후 1.8MPa, 촉진내후성시험 후의 휨강도는 변화가 없는 것으로 나타나 인장강도 측면에서 동결융해에 대한 변화가 발생하였으나 PUa의 경우와 마찬가지로 그 영향이 크지 않을 것으로 판단된다.

PUa의 시험 전 압축강도는 11.6MPa이며 동결융해시험 및 촉진내후성시험 후 11.2MPa로 감소하는 것으로 나타나 압축강도 측면에서 내구성의 저하는 미미한 것으로 판단되며, PUb의 시험 전 압축강도는 9.8MPa이며 촉진내후성시험 후 9.5MPa로, 동결융해시험 후의 휨강도는 변화가 없는 것으로 나타나 압축강도 측면에서 자외선에 대한 내구성의 저하는 미미한 것으로 판단된다.

PUa의 시험 전 탄성계수는 83MPa이며 동결융해시험 후 74MPa, 촉진내후성시험 후 73MPa로 감소하는 것으로 나타났으며, PUb의 시험 전 탄성계수는 60MPa이며 동결융해시험 후 46MPa로, 촉진내후성시험 후 53MPa로 감소하는 것으로 나타났다. 탄성계수 측면에서 시험 전후가 다소 차이가 발생하나 다른

공용 시험 결과에서 특이점을 확인할 수 없으며 그 차이도 10%내외로 확인되어 내구성에 문제가 없는 것으로 판단된다. 단, PUb의 경우 PUa에 비해 동결융해에 따른 탄성계수가 다소 변화하는 경향을 보여 향후 장기공용 시험에서 충분한 검토가 필요할 것으로 사료된다.

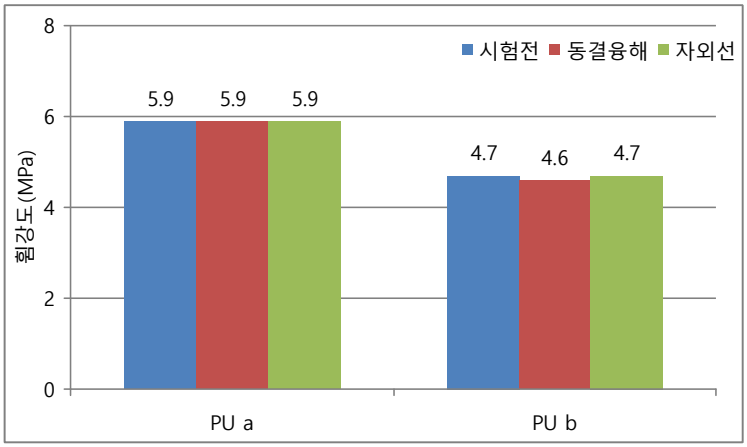


그림 3-2-2-23. 내구성 평가를 위한 휨강도 비교

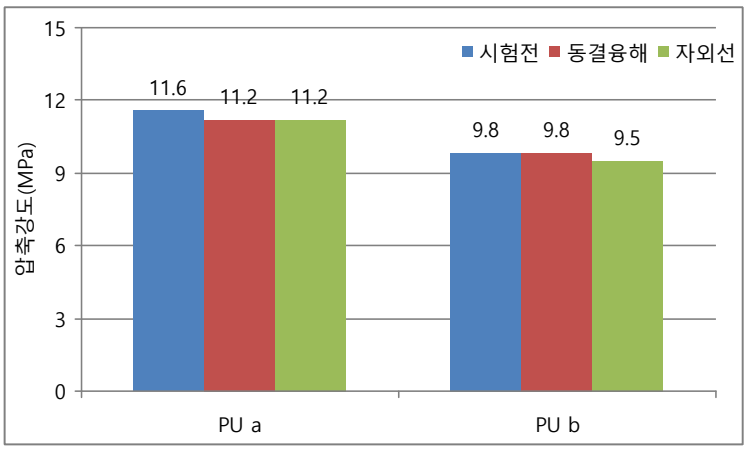


그림 3-2-2-24. 내구성 평가를 위한 압축강도 비교

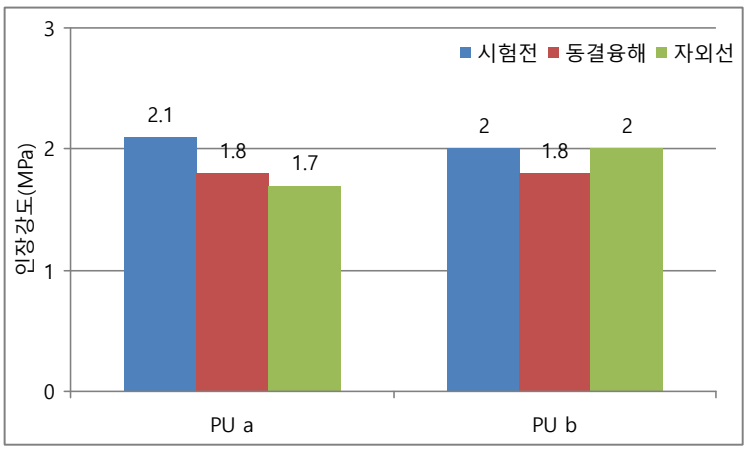


그림 3-2-2-25. 내구성 평가를 위한 인장강도 비교

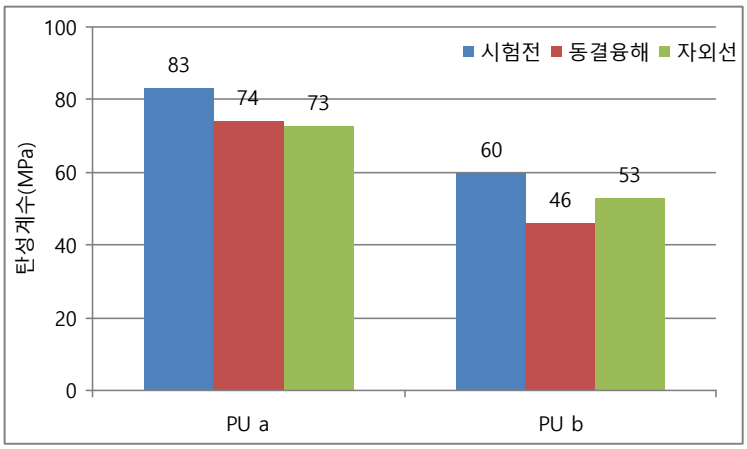


그림 3-2-2-26. 내구성 평가를 위한 탄성계수 비교

염소이온 침투저항성시험 결과, PUa와 PUb의 통과전하량이 0(c)으로 나타났는데 일반적으로 염소이온 침투성은 100(c)보다 작을 경우 염소이온에 대한 내구성 저하가 없는 것으로 판단한다. 따라서, PUa와 PUb는 염소이온의 침투가 전혀 발생하지 않으며 염화물에 대한 내구성이 매우 우수한 것으로 나타났다.

표 3-2-2-2. 통과전하량에 따른 염소이온 침투성

통과 전하량(Coulombs)	염소이온 침투성
>4,000	높 음
2,000~4,000	보 통
1,000~2,000	낮 음
100~1,000	매우 낮음
<100	없음

(3) 피로시험

본 연구에서는 폴리머콘크리트 계열 박층포장재료인 PU에 대하여 빔피로시험(ASTM D 7460-08)을 실시하여 반복하중에 대한 실내 공용성을 평가하였다

(가) 시험방법

반복적인 하중에 따른 교면포장재료의 공용수명을 확인하기 위한 빔피로시험은 사인(Sine) 곡선형태의 변형파형을 재하 및 측정할 수 있는 유압식 만능시험기(MTS)를 이용하여 시험을 실시한다. 반복하중은 빔피로시험용 지그를 이용하여 재하하고, 유압식 만능시험기(MTS)에 부착된 로드셀을 통하여 측정되며, 변형량은 시편 중앙에 부착된 변형 측정용 게이지(LVDT)를 통하여 0.00163초 간격으로 측정한다.

일반적으로 아스팔트콘크리트 포장재료에 대한 빔피로시험은 상온(20℃)에서 5cm×5cm×30cm 시편(포장두께 5cm)을 제작하여 시험을 실시하지만 PUa와 PUb의 경우 12mm 이하의 초박층으로 구성하기 때문에 본 시험에서는 1.2cm×5cm×30cm 시편(포장두께 1.2cm)을 제작하여 균열이 발생하기 쉬운 동절기의 온도조건(-15℃)을 모사하여 수행하였다. 하중은 변형률제어방식으로 5Hz 주기로 반복하중을 재하하여 장경간 강바닥판 케이블교량에서 발생할 수 있는 리브간 최대 처짐인 0.5mm의 처짐이 지속적으로 발생하도록 모사하여 시험을 진행하였다.

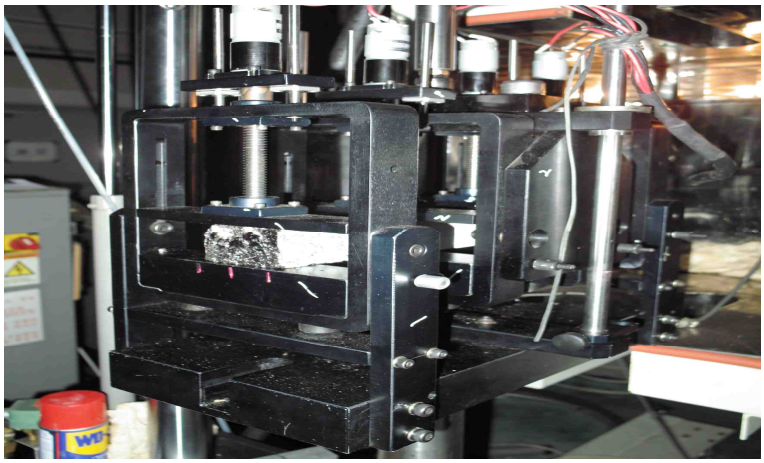


그림 3-2-2-27. 4점 빔피로시험 전경

(나) 시험결과

아스팔트콘크리트에서는 일반적으로 스티프니스가 초기스티프니스의 50%에 도달했을 때까지 시편에 가해진 하중재하회수를 피로수명으로 결정하는 방식, 그리고 하중재하회수에 따른 변형률 진폭의 변화를 그래프로 그린 다음 최소 곡률반경이 되는 지점의 하중재하회수를 피로수명으로 결정하는 방식이 있다(건설교통부, 2003). 그러나 변형률 진폭에 의한 방법은 최소 곡률반경 지점을 명확히 파악하기 어렵기 때문에 본 연구에서는 시편의 초기 스티프니스의 50%에 도달할 때까지 적용된 하중회수를 피로수명으로 결정하였다.

PUa의 스티프니스는 반복하중횟수 1,000,000에서 약 20%정도 감소되어 유지되는 것으로 나타났으며, PUb의 스티프니스는 반복하중횟수 1,000,000회에서 약 13%정도 감소되어 유지되는 것으로 나타났다. 강바닥판 교면포장으로 표층으로 적용하고 있는 PSMA의 스티프니스는 반복하중횟수 약 2,000회에서 20%, 약 37,000회에서 50%, 약 380,000회에서 80% 감소되는 것을 감안하면 PU의 피로공용성능은 PSMA와 비교하여 매우 우수한 것으로 판단된다.

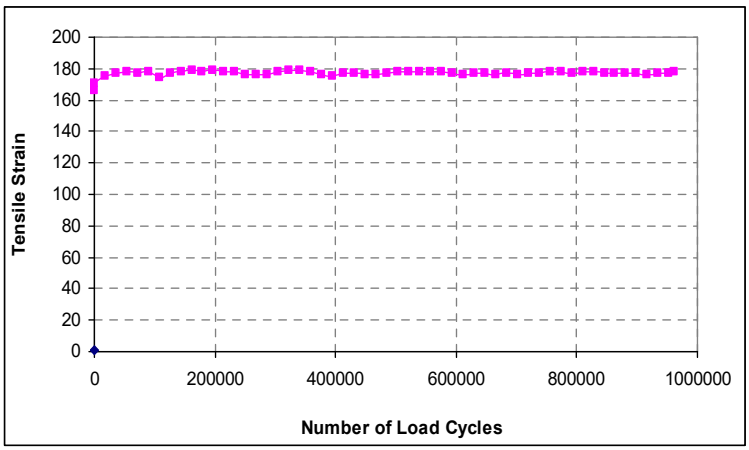


그림 3-2-2-28. PU의 인장변형률 변화

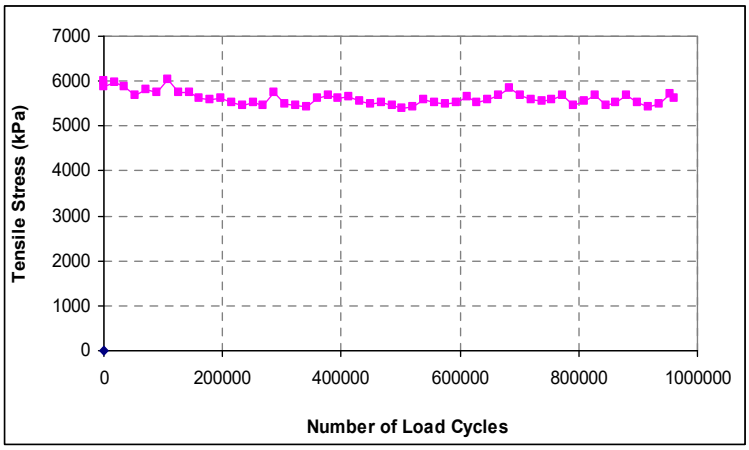


그림 3-2-2-29. PU의 인장응력 변화

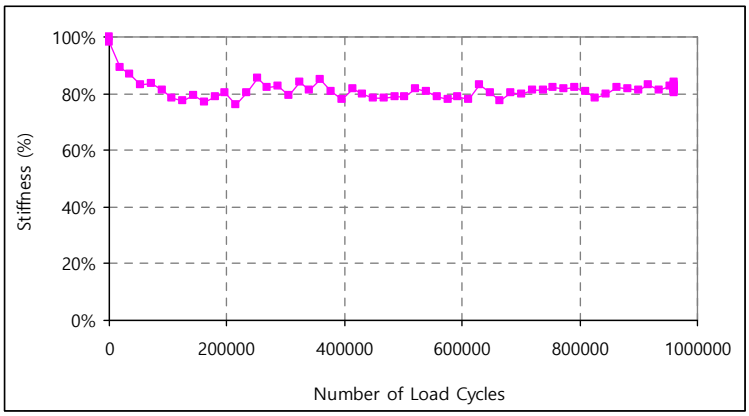


그림 3-2-2-30. PUa의 스티프니스 감소율 변화

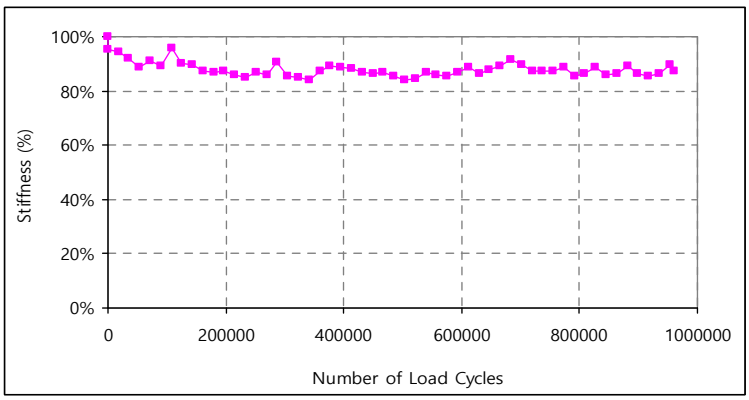


그림 3-2-2-31. PUb의 스티프니스 감소율 변화

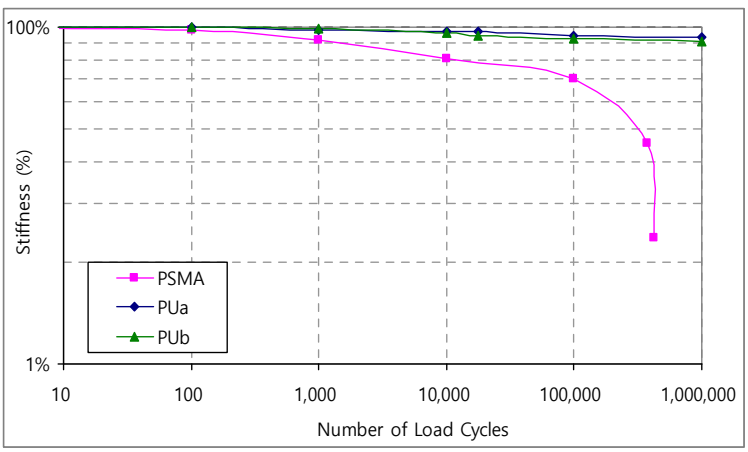


그림 3-2-2-32. 스티프니스 감소율 비교

(4) 소규모 장기공용성시험

(가) 소형포장가속시험기 개발

① 개발배경 및 필요성

국내에는 강바닥판 케이블교량의 교면포장재료로 개질아스팔트, 구스아스팔트 및 SMA 등이 주로 사용되었으며, 인천대교, 영종대교 등 장경간 강바닥판 케이블 교량의 경우 8cm의 포장두께로 교면포장을 시공한 바 있다. 근래 들어 강단가 상승으로 인해 케이블, 강바닥판 등의 재료비가 급격히 증가하고 있는 실정에 따라 경제성 확보 측면에서 교면포장을 박층화함으로써 교량의 고정하중을 경감시켜 결과적으로 케이블 설치비용을 줄이고자 하는 연구가 활발히 진행 중에 있다. 이에 따라 교통하중으로 인한 강바닥판의 구조적 거동하에서 박층교면포장이 장기간 공용될 수 있는지 다양한 국내외 박층 교면포장재료에 대한 장기공용성 검증이 필요한 상황이다.

현재 국내에서 교면포장의 장기공용성을 평가할 수 있는 방법 중 대표적으로 Full scale 포장가속시험을 들 수 있다. 국내에서 Full scale 포장가속시험이 가능한 장비는 한양대학교에서 보유하고 있는 HAPT(Hanyang University Accelerated Pavement Tester)와 한국도로공사 도로교통연구원에서 보유하고 있는 KALES(Korea Accelerated Pavement Loading and Environmental Simulator)가 있다.



그림 3-2-2-33. 한양대 HAPT(좌), 도로교통연구원 KALES(우)

포장가속시험은 실제 교통하중을 유사하게 모사하면서 포장의 장기공용성을 평가할 수 있기 때문에 새로 개발된 포장구조나 재료, 공법 등을 기존과 비교 평가하는데 주로 이용되어 왔다. 하지만, 포장가속시험을 위한 시험체 시공, 가속시험, 철거에 필요한 시간과 비용이 많이 소요되고, 특히 교면포장의 경우 실제 교면포장의 거동을 모사하여 공용성을 평가하기가 어려운 동시에 온도, 습도, 자외선 등 해상환경을 모사할 수 없는 한계점이 있다.

이에 본 연구에서는 해상환경조건을 현장과 유사하게 모사할 수 있는 환경모사챔버를 갖추고 강바닥판 교면포장의 거동을 유사하게 모사가 가능한 소형포장가속시험기를 개발하여, 다양한 박층 교면포장재료에 대한 장기공용성을 보다 현장과 유사한 조건에서 비교검증 할 수단으로 사용하고자 한다.

② 시제품 설계 및 제작

㉮ 개발 개요

본 연구에서 개발하는 소형포장가속시험기는 주로 강바닥판 교면포장재료 및 시스템의 장기공용성을 평가하는데 목적이 있으며, 다음과 같은 내용으로 시험장비를 설계 및 제작하였다.

- 장기공용성시험 환경조건을 현실과 유사하게 모사하기 위하여 실제 해상환경에서의 온도, 습도, 자외선량과 유사하게 제어 가능한 환경모사챔버를 개발하였다.
- 교면포장재료에 대한 장기공용성을 단기간에 검증할 수 있도록 4개 축으로 이루어진 하중재하시스템을 적용하였다.
- 장기간에 걸쳐 수행되는 가속시험으로 인해 발생하는 피로충격과 마모 때문에 시험장비 수명이 감소하는 것을 최소화하기 위해 주행가이드, 충격완화대를 설치하였다.
- 다양한 교면포장재료 및 시스템에 대한 평가를 위해 강판과 포장의 두께를 복합적으로 조절할 수 있도록 스페이서를 활용한 시편거치대를 설치하였다.
- 동일한 조건에서 다양한 포장재료의 장기공용성능을 상대 비교할 수 있도록 최대 3개의 시험체를 동시에 시험 가능한 시편거치대 및 시험용 강판을 제작하였다.

㈏ 시스템 구성

소형포장가속시험기는 크게 하중구동시스템, 주행시스템, 환경모사시스템으로 구성되며 이러한 시스템을 동시에 제어할 수 있는 통합제어시스템이 구축되어 있다.



그림 3-2-2-34. 소형포장가속시험기 시스템 구성

하중구동 및 주행시스템이 갖춰진 메인프레임은 아래의 그림과 같은 설계도를 기반으로 제작하였으며, 환경모사시스템은 챔버형태로 개발하여 온도 및 습도 유지시 효율을 극대화시킬 수 있도록 하였다.

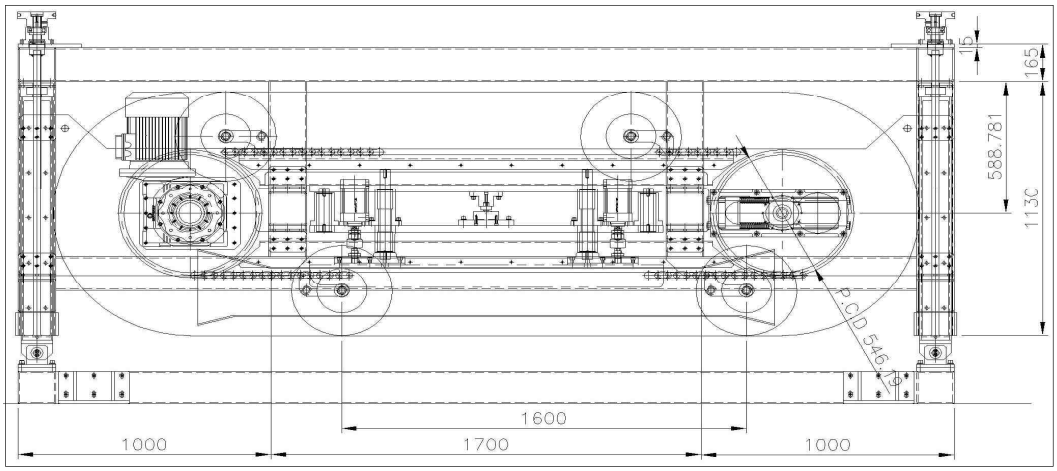


그림 3-2-2-35. 메인프레임 설계도



그림 3-2-2-36. 환경모사가 가능한 챔버 전경

㉠ 하중구동시스템

하중재하는 공압방식으로 콘프레샤를 통해 공기가 공급되며, 최대 1ton까지 재하할 수 있다. 또한 영하권의 온도에서도 시험이 가능하도록 실린더 및 연결장치에 유압식을 병행하여 적용하였다.

하중상태는 메인프레임 중앙에 위치한 로드셀에 의해 실시간으로 모니터링 되며 하중값은 통합제어시스템의 메인 제어판에 표시되도록 하였다. 실제 시편에 재하되는 정확한 하중은 축중계를 이용하여 검증하였으며, 하중조절은 통합 제어시스템에 의해 자동으로 가능하며 메인 제어판에 설치된 조작 버튼을 통해 수동으로도 조절이 가능하다.



그림 3-2-2-37. 공압식 하중재하 장치



그림 3-2-2-38. 재하하중 축중계 검증

신속한 공용성시험 수행을 위해 해중재하축을 4축으로 구성하였으며, 시편에 하중이 재하되는 접지면이 중복되지 않도록 충분한 간격을 두고 배치하였다. 장기공용성시험시 하중재하횟수를 제어하기 위해 레이저 센서를 설치해 축의 회전

수를 실시간으로 파악하고 통합제어시스템을 통해 목표 횟수를 설정하여 계획적으로 시험을 수행할 수 있다.



그림 3-2-2-39. 축 회전수 체크용 레이저 센서(녹색 장치)

소규모 장기공용성시험을 통해 평가할 박층포장재료에는 아스팔트콘크리트 계열부터 상대적으로 강도가 큰 시멘트콘크리트 계열, 폴리머콘크리트 계열 등이 포함되어 있기 때문에 타이어의 마모와 내구성 등을 고려하여 우레탄 재질의 직경 340mm, 폭 120mm인 솔리드형 타이어를 사용하였다.



그림 3-2-2-40. 시험기용 우레탄 솔리드형 타이어

㉡ 주행시스템

주행시스템은 상하 회전형 트랙으로 만들어져 연속적으로 4개의 하중축이 주행할 수 있도록 구성되어 있다. 주행속도는 주행부 가이드에 감겨진 체인을 움직이는 모터를 제어하는 통합제어시스템을 통해 원하는 주행속도를 입력하여 설정할 수 있다. 본 시험기의 최대 주행속도는 10km/h 이며, 1회 회전시 주행거리는 8m로 하중재하횟수 1,000회 기준으로 약 20분 내외의 주행시간이 소요된다. 강바닥판 교량에서는 교통하중에 의해 발생되는 처짐으로 인해 포장체의 파손이 유발될 수 있다. 따라서 강바닥판 교량의 거동을 최대한 모사할 수 있도록 시편을 거치할 수 있는 시편거치대와 시험용 강판을 제작하여 설치하였다. 이 거치대와 강판에는 U리브와 동일하게 주행방향과 평행한 상태로 시편을 구속하기 위해 각 측면에 3공씩 천공해서 구속 볼트, 너트를 이용해 고정할 수 있도록 하였다.

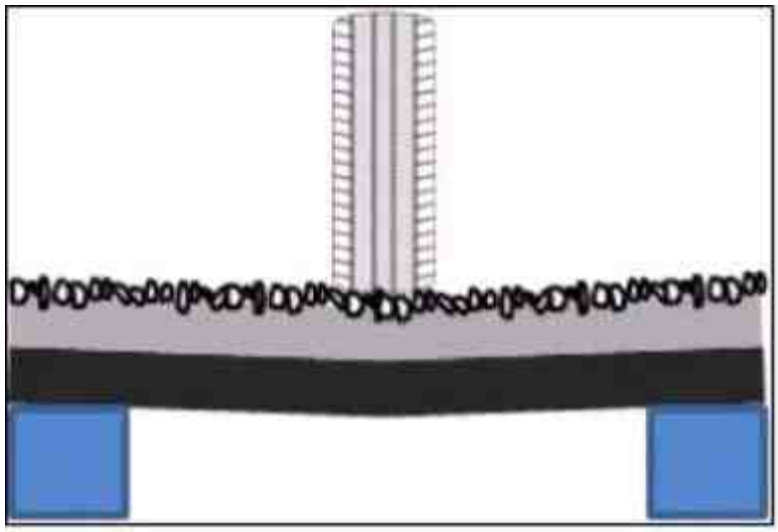


그림 3-2-2-41. U리브간 교면포장 거동 모사도



그림 3-2-2-42. 시편거치대 시편 고정

또한 추가적으로 다양한 시험포장 및 강판 두께를 적용하기 위해 다양한 두께로 스페이서를 제작하였다. 10~50mm 포장두께 범위로 시편을 제작하여 시편거치대에 스페이서와 함께 거치하여 시편 레벨을 동일하게 맞춤으로써 두께가 서로 다른 재료들도 동시에 시험이 가능하도록 하였다.



그림 3-2-2-43. 시편 레벨 조절용 스페이서

소형포장가속시험기는 최대 1ton의 하중을 상하 회전형으로 재하하도록 설계되었기 때문에 직접적으로 하중축이 급강하하여 주행구간에 접촉하게 될 경우, 시편에 정상적으로 하중을 재하하지 못하고 직접적인 충격하중을 가하게 될 수 있다. 따라서 충격완화대 및 주행가이드를 설치함으로써 축하중이 일정하게 유지될 수 있도록 하였다.



그림 3-2-2-44. 충격완화대



그림 3-2-2-45. 주행가이드

㉣ 환경모사시스템

해상의 환경을 모사하여 박층포장재료의 장기공용성을 평가할 수 있도록 온도, 습도, 자외선을 자유롭게 조절할 수 있는 환경모사챔버를 제작하였다.

환경모사챔버를 통해 조절 가능한 온도범위는 -20℃~60℃이다. 이 온도범위 내에서 포장재료가 적용될 교량의 환경조건과 계절적 변동요인에 적합한 온도를 설정하여 장기공용성시험을 수행할 수 있으며, 온도를 변화시켜 시험함으로써 밤낮의 일교차를 모사할 수 있다. 냉난방 및 습도조절장치는 챔버 끝단 중앙 상단에 위치하고 있으며 에너지효율을 극대화하기 위해 챔버와 외부로 통하는 공간을 최소화하였다. 챔버 내에 습도를 발생시키기 위해 수증기를 분사시키는 장치를 냉난방 설비와 일체화하여 설치하였으며, 원하는 습도를 설정하면 습도 측정계가 챔버 내 습도를 계측하여 목표치에 도달할 때까지 수증기 분사장치를 가동하는 방식으로 습도를 조절하며 0~100%의 범위에서 조절이 가능하다.



그림 3-2-2-46. 냉난방 및 습도조절장치

자외선의 경우에는 기상청의 최근 10년간 연평균 자외선량 통계자료를 기준으로 시험 시편이 단기간에 20년의 자외선량에 노출되도록 자외선 램프를 설치하였다. 이 때, 20년간 받을 것으로 예상되는 자외선량을 약 한달 만에 소화할 수 있는 용량의 자외선 램프를 선택하여 보다 가속화된 시험이 가능하도록 하였다. 자외선 램프는 주행대 좌우측 상단에 설치하여 자외선 노출량을 극대화하였다.



그림 3-2-2-47. 자외선 모사 장치

최종적으로 구동시스템, 주행시스템 및 환경모사시스템을 통합하여 총괄적으로 제어할 수 있는 통합제어시스템을 개발하였으며 메인 제어판은 아래 그림과 같이 구성되었다. 메인 제어판은 터치패드로 제작되어 손쉽게 조작이 가능하며, 메인 제어판을 통해서 목표로 하는 하중속도, 하중재하횟수, 최대하중, 온도, 습도, 자외선량을 설정하여 장기공용성시험을 수행할 수 있다. 메인 제어판 사용법은 통합제어시스템 내에 전자문서화하여 누구나 쉽게 확인하여 장비구동이 가능하며, 별도로 소형포장가속시험기 운영매뉴얼을 만들어 사용법 습득이 용이하도록 하였다.



그림 3-2-2-48. 통합제어시스템 메인 제어판

(나) 공용성시험

① 시험개요

㉮ 시험 목적

소규모 장기공용성시험을 수행하는 주요 목적은 본 연구에서 자체개발한 소형 포장가속시험기를 이용하여 대안으로 선정된 강바닥판 박층포장재료의 장기공용성을 비교검증하여 최적의 포장재료를 선정하고자 함이다.

㉯ 시험 조건

시험해야할 시편의 종류가 다양하고 시험조건이 다양함에 따라 보다 가속화된 공용성시험을 위해 강바닥판 교면포장의 거동을 모사하기 위한 U리브간 처짐을 최대 6mm까지 발생시키도록 하중 및 접지압을 설정하였다. 시험 온도는 -20℃, 20℃, 60℃로 각각 동절기, 상온, 하절기를 모사할 수 있도록 설정하였으며, 습도는 국내 연평균습도 평균인 60~70%로 적용하였다. 다만 동절기 모사의 경우, 영하 20℃의 극한상태 하에서 수증기 분사식 습도조절장치의 결빙문제로 인해 습도적용은 제외하였다. 자외선은 연평균 자외선량을 기준으로 20년간 받을 것으로 예측되는 자외선 총량에 해당되는 자외선량을 시험체에 방사하도록 하였다.

② 시험체 제작

소규모 장기공용성시험을 수행하기 위해 시험조건별로 2개의 시험체를 제작하였다. 시험체 크기는 폴리머콘크리트 계열은 500×350×12mm, 매스틱아스팔트 및 고인성 섬유보강 콘크리트는 500×350×40mm 이며, 위와 같은 시험체 크기는 강바닥판 교면상판의 U리브간격이 300~350mm 정도임을 고려하여 결정하였다.

표 3-2-2-3. 시험조건별 시험체 제작 개수

포장재료	시험조건별 시험체(개) (단 습도, 자외선량 조건 동일)			
	-20℃	20℃	60℃	계
PUa	2	2	2	6
PUb	2	2	2	6
Mastic&PSMA	2	2	2	6
DFRCC	2	2	2	6
계				24

각 포장재료별 시험체는 재료 각각에 해당하는 최적 배합비 및 배합과정에 따라 제작하였으며, 보다 자세한 시편제작과정에 대한 내용은 다음에 설명하였다.

㉮ 폴리머콘크리트 시험체 제작

폴리머콘크리트는 재료별로 구성되는 재료와 배합비가 각각 틀리지만 기본적으로 주제와 경화제를 1차적으로 교반한 후, 이어서 골재를 첨가하여 교반함으로써 슬러리를 만들어내는 배합과정은 동일하다. 시험체를 제작하기 위해 소규모 장기공용성시험용 강판을 제작하였으며, 그 위에 몰드 역할을 하는 거푸집을 설치하였다. 이어서 슬러리와 강판 간의 접착성을 향상시키는 역할을 하는 프라이머층을 1mm 이하의 두께로 강판 위에 시공하였다.



그림 3-2-2-49. 소규모 장기공용성시험용 강판



그림 3-2-2-50. 프라이머층 시공

프라이머가 모두 경화되었는지 확인 후, 슬러리 제작을 위해 주제와 경화제를 배합비에 따라 계량한 후, 전동 핸드믹서기를 이용하여 1분간 교반하였다.



그림 3-2-2-51. 폴리머 콘크리트 재료별 계량



그림 3-2-2-52. 주제+경화제 배합

이어서 골재를 첨가하여 1~2분간 교반한 후, 준비된 시험체 몰드에 부어 시험체 두께에 맞도록 레벨링을 실시하였다. 시험체가 모두 양생된 후, 거푸집을 제거하여 최종적으로 시험체 제작을 완료하였다.



그림 3-2-2-53. 슬러리 배합



그림 3-2-2-54. 양생이 완료된 시험체

㉯ 매스틱아스팔트

매스틱아스팔트 재료는 고온, 고압 상태에서 교반이 되어야하기 때문에 별도로 제작된 소형 쿠커장비를 이용하여 시험체를 제작하였다. 본 연구에서 매스틱아스팔트와 PSMA를 각 2cm로 구성된 시험체를 제작하기 위해서 몰드를 제작하였다.

준비된 몰드에 소규모 장기공용성시험용 강판을 거치한 뒤, 1차적으로 매스틱아스팔트 재료를 소형 쿠커를 이용해 가열상태에서 교반하여 2cm 두께로 포설하였다. 매스틱 아스팔트는 별도의 다짐 과정이 필요하지 않기 때문에 포설된 상태로 양생을 실시하였다. 매스틱아스팔트 층이 모두 양생된 후, 택코팅을 실시하고 PSMA를 포설하였으며, 진동롤러를 사용해 충분히 다짐을 실시하여 시험체 제작을 완료하였다.



그림 3-2-2-55. 매스틱 아스팔트층 포설



그림 3-2-2-56. PSMA층 포설 후 다짐 실시

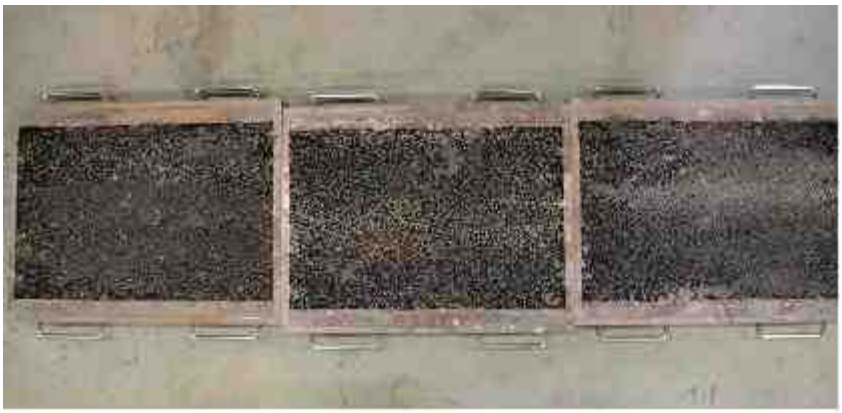


그림 3-2-2-57. 다짐 완료된 매스틱 아스팔트 시험체

㉰ 고인성 섬유보강 콘크리트(DFRCC)

콘크리트 재료의 취약한 부착성능을 향상시키고 강바닥판의 부식 및 보호를 위해 폴리머 콘크리트를 이용하여 부착 및 방수층을 형성하였다. 1~2mm의 얇은 두께로 폴리머 콘크리트 층을 시험용 강판 위에 시공한 후, 골재를 칩핑하여 부착 및 방수층을 구성하였다. 부착 및 방수층 양생된 후, 고인성 섬유보강 콘크리트를 배합하여 접착층 위에 포설하는 방식으로 시험체 제작을 진행하였다. 고

인성 섬유보강 콘크리트 시험체는 일반 시멘트콘크리트 포장재료 배합과정과 유사하게 실시하되 굵은 골재를 뺀 모르타르 상태의 재료에 PVA 섬유를 넣어 제작하였다.



그림 3-2-2-58. 모르타르 형태의 시멘트 콘크리트



그림 3-2-2-59. PVA 섬유

소형포장가속시험기 시편 거치대에 정확한 크기로 시험체를 거치할 수 있도록 목재로 거푸집을 설치하여 시험체를 제작하였으며, 제작된 시험체는 증기 양생을 통하여 단기간에 충분히 강도발현을 시킴으로써 다른 포장재료들과의 동시 비교시험이 가능하도록 하였다.



그림 3-2-2-60. 양생 완료된 DFRCC 시험체

③ 소규모 장기공용성시험 실시

제작된 시험체 중 종류별로 시험체 3개를 소형포장가속시험기에 시편을 거치한 후, 시험조건에 따라 환경모사챔버의 온도, 습도, 자외선량을 설정하여 시험체가 시험조건을 만족할 때까지 안정화 과정을 거치도록 하였다.



그림 3-2-2-61. 시험체 거치

시험체가 모두 설정한 시험조건에 맞게 안정화되었는지 여부를 확인한 후, 하중 750kg, 접지압 2.89MPa, 시험속도 7km/h의 가동조건 하에서 소규모 장기공용성 시험을 실시하였다. 기본적으로 하중재하횟수 5,000회 간격으로 균열, 소성변형, 부착상태 등의 시험체의 파손상태를 지속적으로 모니터링 하였으며, 아스팔트 계열 박층포장재료의 경우 초기에 소성변형이 발생할 가능성을 고려하여 하중재하횟수 1,000회 간격으로 변형량을 체크하였다.

④ 시험결과

각 재료별 시험체에 대한 소규모 장기공용성시험을 수행한 결과, 동절기(-20℃)와 상온(20℃)의 조건에서 시험을 수행한 시험체는 모두 400,000회 이상의 하중이 가해졌음에도 별다른 포장파손이 발생하지 않았다. 그러나 하절기(60℃)의 조건에서 시험을 수행한 시험체의 경우에 폴리머콘크리트 계열 재료는 모두 포장파손 없이 우수한 공용성능을 보였으나, 매스틱 아스팔트와 DFRCC는 상대적으로 적은 하중횟수에 포장파손이 발생하였다.

표 3-2-2-4. 소규모 장기공용성시험 결과

포장재료	초기파손발생시 하중재하횟수(회)		
	-20℃	20℃	60℃
PUa	400,000 이상	400,000 이상	400,000 이상
PUb	400,000 이상	400,000 이상	400,000 이상
Mastic & PSMA	400,000 이상	400,000 이상	3,000
DFRCC	400,000 이상	400,000 이상	145,000



그림 3-2-2-62. 폴리머 콘크리트 시험체(좌 : PUa, 우 : PUb)

특히 매스틱 아스팔트 재료의 경우엔 3,000회의 매우 적은 하중횟수에도 불구하고 “한국도로공사 포장유지관리 소성변형에 의한 등급기준“의 소성변형 보수기준인 12.5mm를 상회하는 상당히 큰 소성변형이 발생하였는데, 이는 시험체가 60℃의 고온상태에서 소형포장가속시험기에서 적용 중인 타이어의 접지압이 2.89MPa로 일반적인 중차량 평균 접지압인 0.75MPa의 4배 가까이 됨에 따라 소성변형이 상당히 크게 발생한 것으로 판단된다(건설교통부, 2004).



그림 3-2-2-63. 매스틱 아스팔트 시험체(3,000회 하중 재하 후)

또한, DFRCC 시험체의 포장파손은 1차적으로 폴리머 콘크리트 층과 DFRCC 간의 부착력이 약화되어 분리된 이후에, 반복되는 처짐과 피로하중에 의해 DFRCC 시험체의 취약한 부분부터 균열이 발생하는 것으로 파악되었다. 이는 60℃의 고온상태에서 시험체와 강판의 열팽창계수 차이로 인해 시험체가 받는 손상이 컸기 때문인 것으로 판단된다.

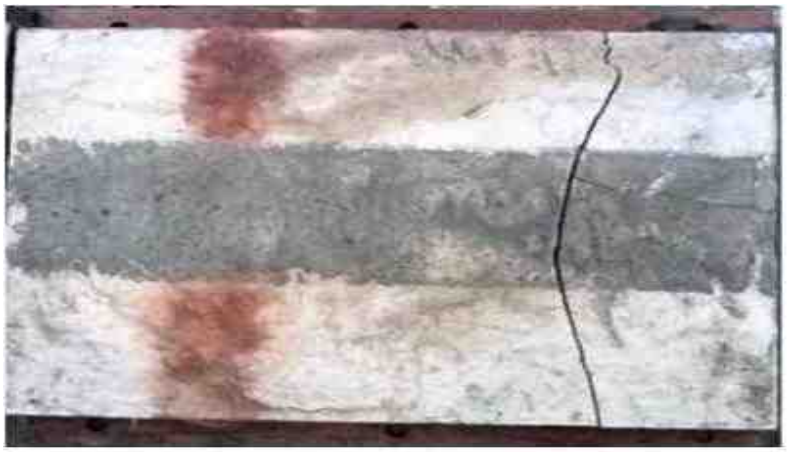


그림 3-2-2-64. DFRCC 시험체(145,000회 하중 재하 후)

DFRCC의 경우 재료를 배합하는 과정에서 PVA섬유가 균질하게 분포되지 못해 시험초기에 파손되는 불량한 시험체가 일부 확인되었다. 이는 향후 박층포장재료로 DFRCC를 활용할 경우 재료 생산과정에서 개선되어야 하며 특히 이점을 유의하여 품질관리가 철저히 이루어져야 한다.

(다) 소형포장가속시험기 시제품 효과분석

Small-Scale 공용성평가 장비인 소형포장가속시험기는 Full-Scale 공용성평가 장비인 윤하중시험기에 비하여 단시간 내에 적은 비용으로 다양한 박층포장재료의 공용성을 평가하기 위한 목적으로 개발되었다. 본 연구에서 수행한 소형공용성평가시험과 윤하중시험을 동일한 하중재하횟수(20만회)를 기준으로 소요된 시험시간을 비교한 결과, 소형포장가속시험의 시험시간이 약 2주가 소요되는 반면에 윤하중시험은 약 4주가 소요되는 것으로 나타났다. 또한, 동일한 조건으로 시험비용을 분석한 결과, 소형포장가속시험의 시험비용이 윤하중시험의 경우보다 약 50% 절감되는 효과가 나타났다.

표 3-2-2-5. 공용성평가장비의 비교

	Full-Scale 공용성평가장비 (윤하중시험기)	Small-Scale 공용성평가장비 (소형포장가속시험기)
전경		
특징	많은 시험시간 및 비용 필요 실제 중차량 하중재하 가능 교량 구조물 거동모사 가능	시험시간 단축 및 비용절감 가능 온도 제어 가능(-20~60℃) 습도 제어 가능(최대 100%) 자외선 제어 가능(12.8W)

(5) 윤하중시험

(가) 시험개요

윤하중시험은 강바닥판 교량 구조물위에 박층포장재료를 시공하여 중차량의 윤하중을 반복적으로 주행하여 박층포장재료의 공용수명과 강바닥판 교량의 구조적인 안정성을 평가하는 것을 목적으로 한다.



그림 3-2-2-65. 윤하중시험 전경

(나) 시험체 제작

본 시험을 위하여 다음 그림과 같이 강바닥판 교량구조물을 제작하였다. 강바닥판 교량 구조물 시험체의 크기는 350×300cm로, U리브는 두께 6mm, 폭 300mm, U리브간 간격을 300mm로 하여 5개를 배치시켰으며, 횡리브는 두께 8mm, 높이 500mm로 하여 설치하였다. 하중은 폭 22cm의 Dual Tire를 사용하여 다음 그림과 같이 U리브와 U리브간에 각각 위치하도록 하여 200mm 길이로 운행하였다.

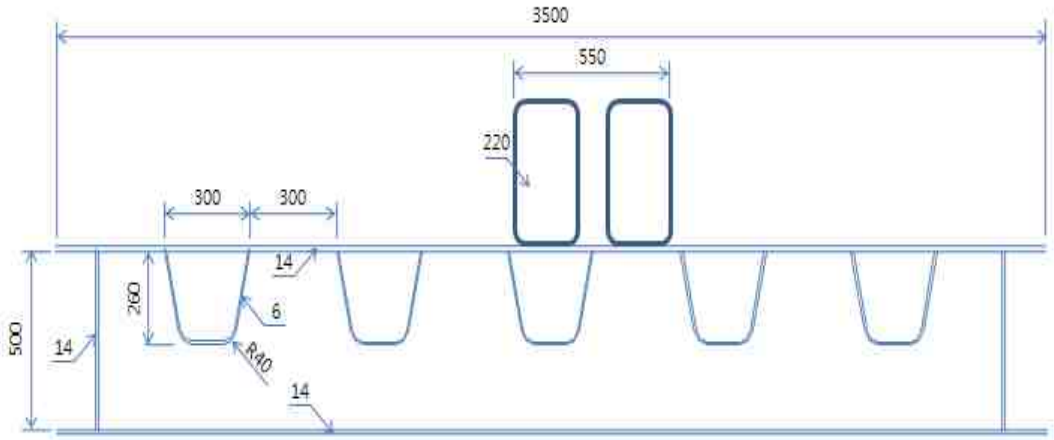


그림 3-2-2-66. 윤하중시험 하중재하 위치 및 강바닥판 시스템 제원

제작된 강바닥판 교량구조물에 폴리머계열 박층포장재료를 시공하기 위하여 강바닥판에 숏블라스팅 작업을 실시하여 표면처리를 하고, 박막의 우레탄 계열 프라이머와 약 10mm 두께의 포장층을 시공하였다. 또한, 보크사이트와 제강슬래그를 이용하여 약 2mm 두께의 미끄럼 및 마모층을 설치하였다.



표면처리 실시



프라이머 시공



포장층 시공



미끄럼방지층 설치

그림 3-2-2-67. 폴리머계열 박층포장재료 시공과정

제작 완료된 폴리머계열 박층포장시스템 시험체의 윤하중시험시 구조적으로 발생하는 처짐량과 인장변형률을 측정하기 위하여 LVDT와 Strain Gauge와 같은 센서를 다수 설치하였다. 센서의 설치위치는 구조해석을 실시하여 다음 그림과 같이 취약부로 확인된 U리브와 U리브간에 집중적으로 설치하였다.

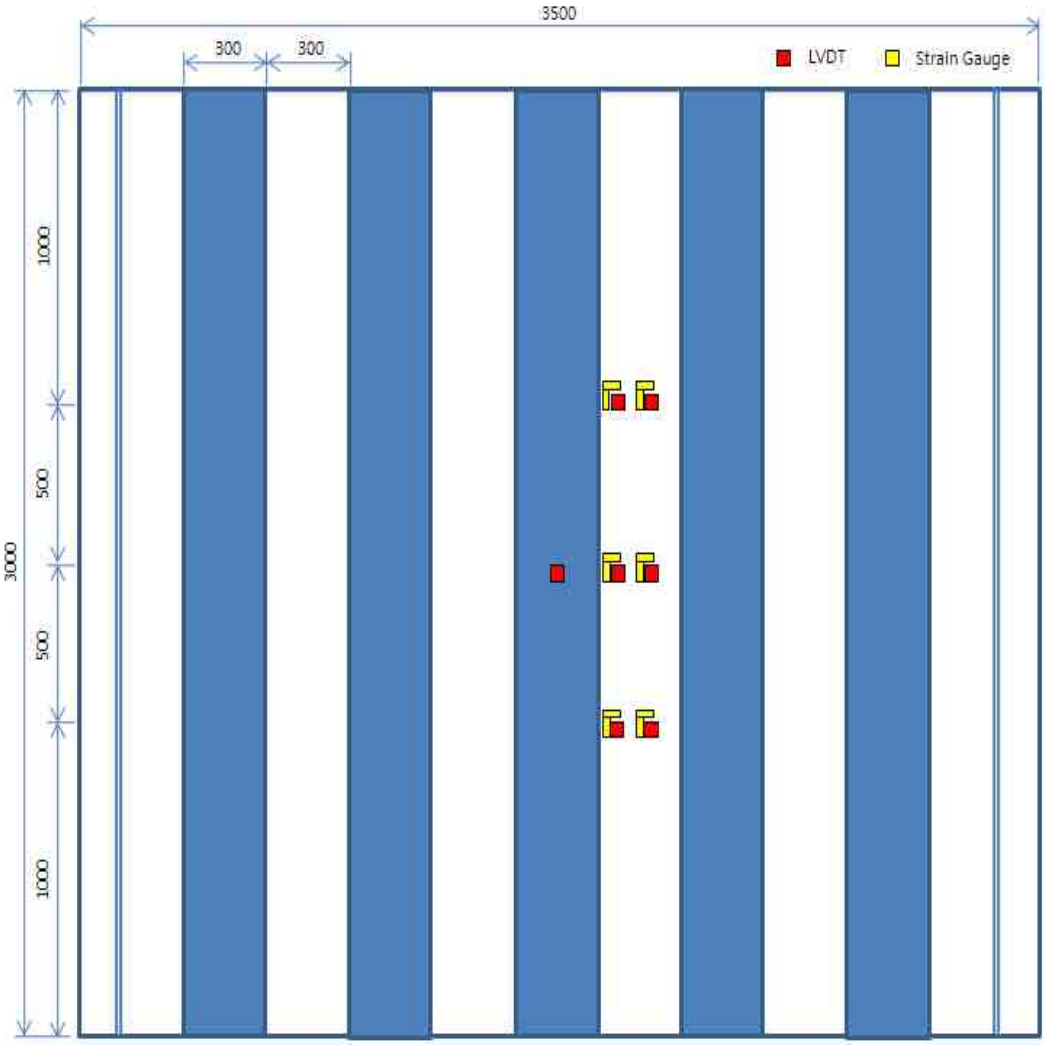


그림 3-2-2-68. 박층포장시스템 시험체의 센서 설치 위치

모든 시험체의 윤하중시험 완료 후 소성변형, 균열, 마모와 같은 포장의 손상 발생정도 및 계측결과와 현장부착강도를 측정하여 포장의 공용성과 강바닥판 교량 구조물의 안정성을 평가한다.

나. 박층교면포장 이용기술 개발

(1) 구조해석

본 연구에서는 박층교면포장시스템의 포장층과 강바닥판에서 발생하는 거동을 확인하기 위하여 “MIDAS CIVIL 2009” 해석프로그램을 이용하여 구조해석을 실시하였다.

(가) 해석조건

① 강바닥판 조건

해석을 위한 강바닥판의 설계는 강바닥판(Steel plate) 두께 14mm, U리브 두께 6mm, 횡리브(Cross beam) 두께 8mm, 횡리브판(Cross beam plate) 두께 18mm를 적용하였고 횡리브 간격 2.5m, U리브폭과 U리브간 간격은 0.3m로 적용하였으며, 해석하고자 하는 포장층과 강바닥판 부분은 입체(Solid) 요소로 U리브와 횡리브는 면으로 모델링하였다.

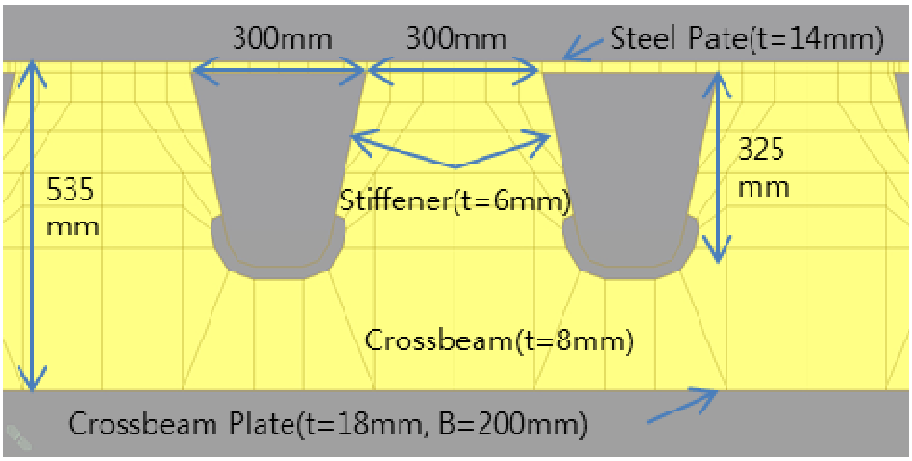


그림 3-2-2-69. 강바닥판 모델링 제원

② 경계조건

교면포장시스템과 같은 다층(Multi-layers) 유한요소해석(Finite element analysis)에서는 경계조건이 해석에 큰 영향을 주기 때문에 가능한 교량 구조물과 동일한 조건으로 구현하여야 한다.

본 해석을 위한 교량구조물의 경계조건은 실제 교량구조물에서 횡리브 양쪽 전단면이 거더(Girder)에 용접되거나 볼트로 연결되어 있으므로 횡리브 양쪽을 모두 구속하는 조건으로 모델링하였다.

③ 하중조건

본 해석을 위한 하중의 조건은 Dual-wheel single axle로 8.2ton을 적용하였으며, 타이어 접지압은 120Psi로 등가 접지면적으로 환산하여 22cm × 22cm 정사각형으로 타이어와 타이어 간격은 11cm로 모델링하였다.

포장부에서 발생하는 피로균열은 인장에 의하여 발생하는데 타이어가 위치한 부분에서는 정모멘트(Positive moment)가 발생하여 상향(Bottom-up) 크랙이 발생하며, 타이어와 타이어 사이에서는 부모멘트(Negative moment)가 발생하여 하향(Top-down) 크랙이 유발된다. 따라서 해석구간은 선행된 연구(Medani TO. 2006)를 통하여 포장과 강바닥판 하부에서 인장변형률이 최대로 발생하는 구간을 Section 1로, 포장과 강바닥판 상부에서 인장변형률이 최대로 발생하는 구간을 Section 2로 설정하였다.

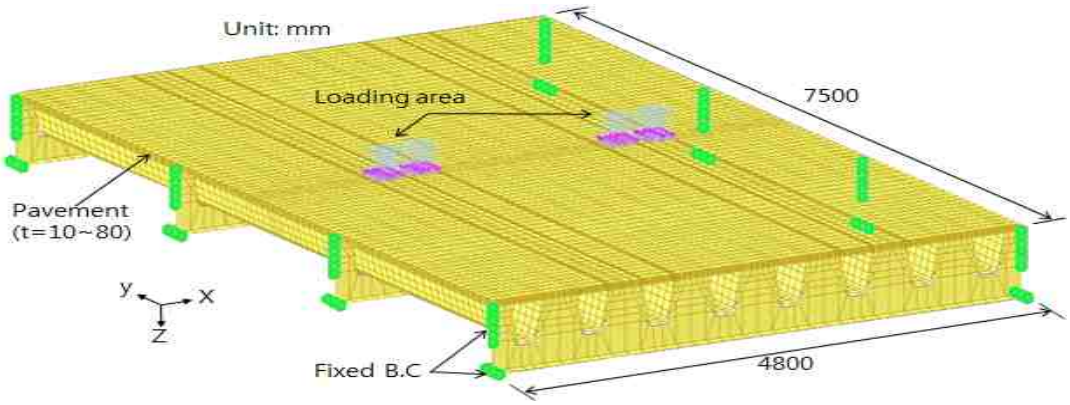


그림 3-2-2-70. 강바닥판의 경계조건 및 하중조건

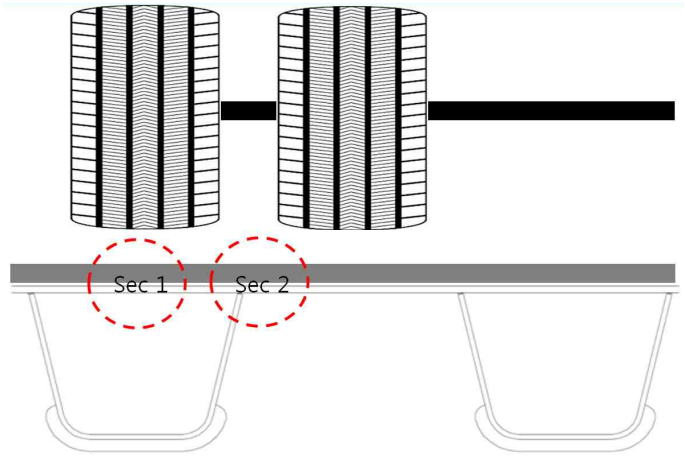


그림 3-2-2-71. 구조해석구간 위치

④ 포장재료 조건

본 연구에서는 일반적인 강바닥판 교면포장공법 80mm를 적용하였을 경우와 장경간 강바닥판 케이블교량에 적용하기 위한 아스팔트콘크리트 박층교면포장공법 40mm를 적용하였을 경우, 그리고 폴리머콘크리트 초박층교면포장공법 10mm를 적용하였을 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 강바닥판 교량에 강성포장체를 적용하였을 경우에는 교량 구조물에 발생하는 응력이 크게 저감되는 것으로 보고(배두병, 2011)되어 본 해석에서는 시멘트콘크리트 계열 박층포장재료를 적용하는 경우는 제외하고 해석을 진행하였다.

표 3-2-2-6. 구조해석을 위한 재료별 물성

폴리머 콘크리트	탄성계수(MPa)		140
	단위중량(kgf/㎤)		1.8
	포아송비		0.3
아스팔트 콘크리트	PSMA	탄성계수(MPa)	3.2 × 103
		단위중량(kgf/㎤)	2.3
		포아송비	0.3
	Guss	탄성계수(MPa)	7.8 × 103
		단위중량(kgf/㎤)	2.3
		포아송비	0.3
강바닥판	재료특성		KS-Civil (Korea Industrial Standards)
	탄성계수(MPa)		2.1 × 105
	단위중량(kgf/㎤)		7.85
	포아송비		0.3

(나) 해석결과

① 포장재료별 해석결과

포장과 강바닥판 하부에 인장변형률이 최대로 발생하는 Section 1의 포장부에서 폴리머콘크리트의 인장변형률은 -268με, Mastic&PSMA 40mm는 -46με, Mastic&PSMA 80mm는 -8με로 나타났으며, 강바닥판에서 폴리머콘크리트의 인장변형률은 181με, Mastic&PSMA 40mm는 78με, Mastic&PSMA 80mm는 38με로 나타나 포장두께가 두꺼워질수록 인장변형률이 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 포장과 강바닥판 상부에 인장변형률이 최대로 발생하는 Section 2의 포장부에서 폴리머콘크리트의 인장변형률은 689με, Mastic&PSMA 40mm는 214με, Mastic&PSMA 80mm는 7με로 나타났으며, 강바닥판에서 폴리머콘크리트의 인장변형률은 280με, Mastic&PSMA 40mm는 101με, Mastic&PSMA 80mm는 55με로 나타나 포장부와 강바닥판 모두에서 포장두께가 두꺼워질수록 인장변형률이 감소하는 것으로 나타났다.

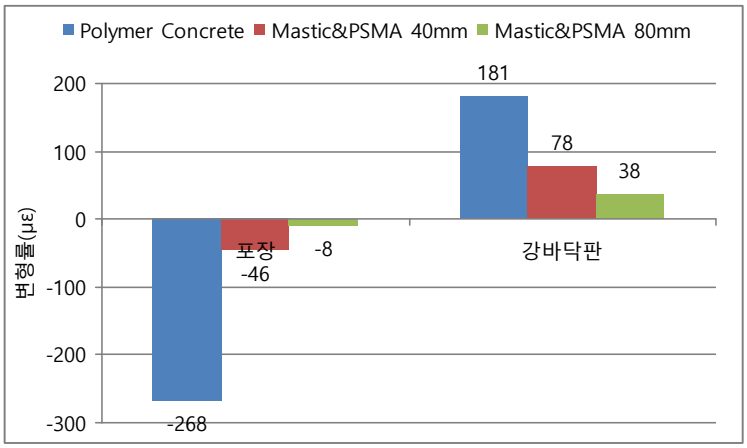


그림 3-2-2-72. 포장공법별 인장변형률 비교(Section 1)

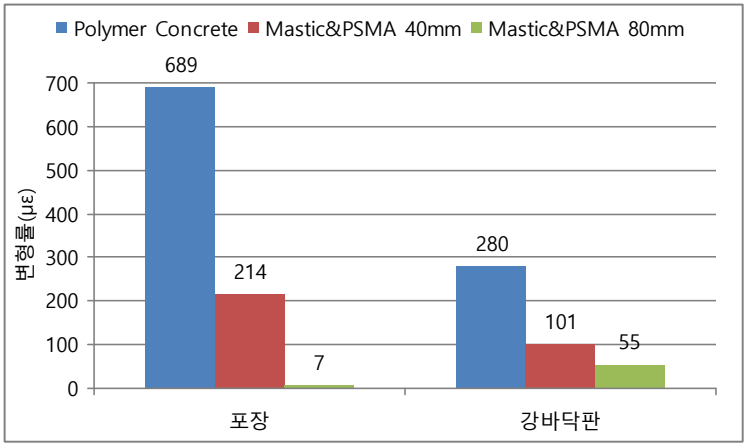


그림 3-2-2-73. 포장공법별 변형률 비교(Section 2)

② 강바닥판 두께별 해석결과

본 연구에서는 두께 10mm의 폴리머콘크리트계열의 박층포장을 적용하였을 때 강바닥판의 두께 변화에 따른 포장부와 강바닥판의 인장변형률 변화를 비교하였다.

포장과 강바닥판 하부에 인장변형률이 최대로 발생하는 Section 1의 포장부에서 강바닥판 두께가 14mm일 때 포장하부의 인장변형률은 -268με, 16mm일 때 -246με, 18mm일 때 -207με로 나타났으며, 강바닥판 두께가 14mm일 때 강바닥판 하부에서 발생하는 인장변형률은 181με, 16mm일 때 145με, 18mm일 때 119με로 나타나 강바닥판의 두께가 두꺼워질수록 인장변형률이 감소하는 것으로 확인되었다. 또한, 포장과 강바닥판 상부에 인장변형률이 최대로 발생하는 Section 2의 강바닥판 두께가 14mm 일 때 포장상부의 인장변형률은 689με, 16mm일 때 509με, 18mm일 때 393με로 나타났으며, 강바닥판 두께가 14mm일 때 강바닥판 상부의 인장변형률은 280με, 16mm일 때 208με, 18mm일 때 158με로 강바닥판의 두께가 두꺼워질수록 인장변형률이 감소하는 것으로 나타났다.

본 연구결과와 같이 포장두께의 박층화에 따라 강바닥판에서 발생하는 인장변형률이 증가하여 피로 손상을 야기하기 때문에 강바닥판의 두께를 일정 두께 이상으로 증가시켜야 한다. 이탈리아의 메시나대교(Messina strait bridge)의 교면포장은 40mm이하의 아스팔트콘크리트계열의 박층포장으로 당초 설계되었으나 대안공법으로 10~12mm의 폴리머콘크리트계열의 초박층포장이 제시되어 교량

의 고정하중을 감소시키는 방안이 검토되었다. 그러나 교면포장이 박층화가 되면 강바닥판의 응력과 변형률이 과다하게 발생하기 때문에 대안공법을 적용할 때 강바닥판의 두께를 15~17mm로 증가시키는 방안이 제시되었다.

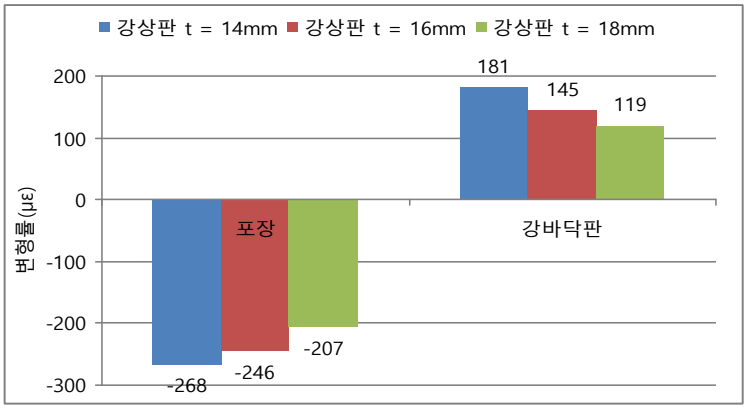


그림 3-2-2-74. 강바닥판 두께별 인장변형률 비교(Section 1)

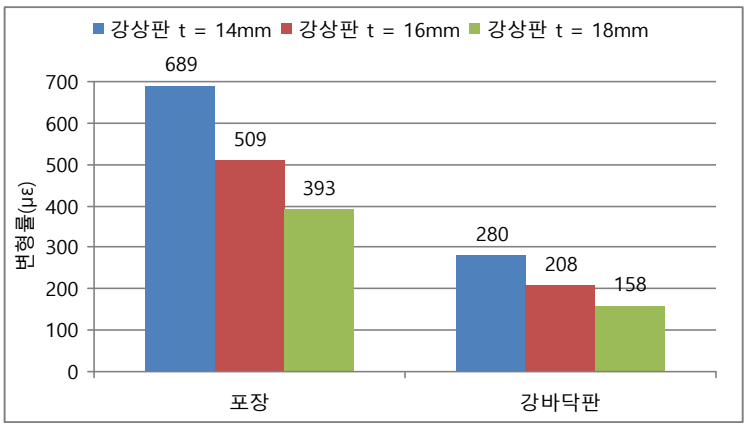


그림 3-2-2-75. 강바닥판 두께별 인장변형률 비교(Section 2)

(2) 시공장비 개발

(가) 개발배경 및 필요성

본 연구에서 연구개발 중인 장경간 강바닥판 케이블교량용 박층포장재료 및 시스템을 실제 교면포장에 적용하기 위한 이용기술개발의 일환으로 박층포장 시공장비 개발을 동시에 진행 중에 있다. 앞선 실내 시험 및 장기공용성 평가 결과 내후성과 내마모성, 내구성 등의 측면에서 폴리머 콘크리트 재료가 매우 우

수한 것으로 나타났다. 또한 콘크리트 계열 재료를 강바닥판 교면포장에 적용하는 기술을 고안하여 접착층으로써 폴리머 콘크리트를 적용했을 경우의 장기공용성을 검증한 결과, 우수한 공용성능을 보이는 것으로 나타났다. 하지만 현재 국내에서는 폴리머 콘크리트 재료에 대한 규격화된 시공장비가 존재하지 않아 지금까지는 단순 교반기를 이용한 인력시공에 의존하여 시공된 바 있다. 폴리머 콘크리트의 강도 발현 및 작업성, 시공성은 정밀도 높은 배합비 준수와 배합과정 및 시공과정의 정확도에 따라 크게 좌우되기 때문에, 규격화된 시공장비 없이 인력시공에 의존할 경우 다양한 시공조건 및 시공기술자의 경험에 따라 시공결과가 크게 달라질 수 있는 문제점이 있다. 따라서 폴리머 콘크리트 시공장비 개발이 필요하며 본 연구에서는 폴리머 콘크리트 계열 포장재료를 대상으로 한 자동화 교반시스템 개발을 통해 배합 및 교반, 포설, 레벨링 등의 일련의 시공과정을 통합하여 기계화 시공이 가능하도록 박층포장 시공장비를 개발하고자 한다.

(나) 개발 개요

본 연구에서 개발하는 박층포장 시공장비는 폴리머 콘크리트 계열 교면포장재료를 대상으로 한 교면포장 시공을 목적으로 하며, 다음 그림과 같은 단계를 거쳐 개발을 진행한다. 우선 박층포장 시공장비의 핵심이라 할 수 있는 자동배합 시스템에 대한 소규모 시작품 설계 및 제작을 진행하여 1차적으로 시험운영을 통해 보완사항을 검토하는 과정을 거친다. 이후 실규모로 자동배합시스템 시제품 설계 및 제작을 진행하여 시험운영을 거친 후, 자동 포설, 레벨링 및 골재칩핑 시스템을 개발하여 모든 시스템을 일체화하여 시공장비 차량에 설치함으로써 박층포장 시공장비 시제품 제작을 완료한다. 이후 현장시험시공에 완성된 시공장비 시제품을 투입하여 시공성 및 현장적용성을 검증하고 보완점을 파악하여 보완조치 후 최종적으로 사업화 제품으로 개발을 완료할 계획에 있다.



그림 3-2-2-76. 박층포장 시공장비 단계별 개발 내용

박층포장 시공장비 개발에 있어서 중요한 사항은 다음과 같다.

- 경화속도가 빠른 폴리머 콘크리트 재료 특성상 교반기 청소가 용이하여야 하며, 교반에 사용되는 교반날은 소모품으로 상시 교체가 가능하여야 한다.
- 배합비가 정확하게 지켜질 수 있도록 배합재료를 일정비율로 분배해주는 유압 장치의 성능이 정밀하게 유지될 수 있도록 하여야 한다.
- 평탄성 확보를 위해 칩핑골재는 반드시 일정한 속도와 양으로 고르게 칩핑되도록 하여야 한다.

(다) 시작품 개발

박층포장 시공장비 개발의 연구단계 일환으로 폴리머계열 박층포장재료를 정밀하게 배합 및 포설을 할 수 있는 자동배합시스템을 개발하였다. 본 자동배합시스템은 1회 배합하여 15L 이상을 생산할 수 있도록 계획하여 실물크기의 1/10 수준으로 제작하였다.

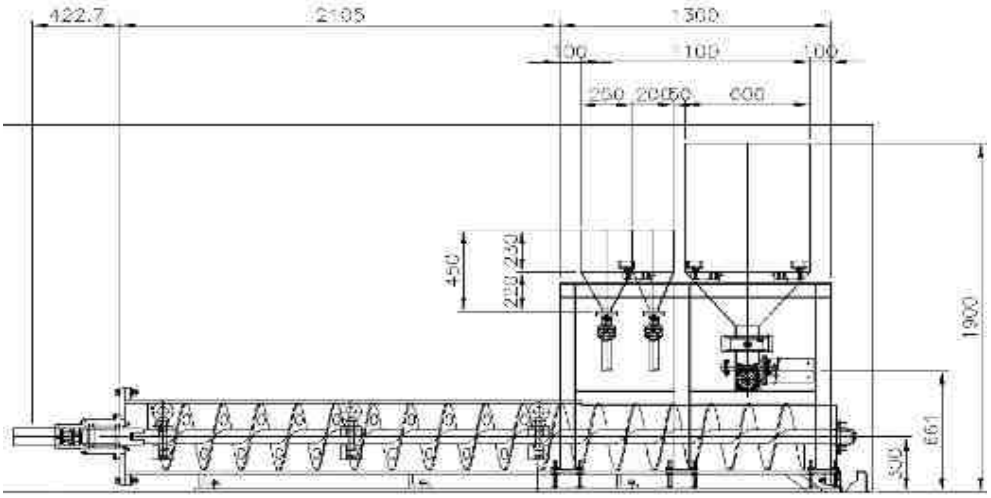


그림 3-2-2-77. 박층포장 시공장비 시작품(스크류 방식) 설계도

제작된 시작품은 주제(액체)+경화제(액체)+골재(분말형태)로 배합재료가 구성되는 폴리머 콘크리트 재료의 특성을 고려하여 크게 3개의 재료저장탱크와 각 탱크에서 일정비율로 재료를 교반기로 보내주는 유압장치, 그리고 각 배합재료를 교반해주는 스크류 방식의 교반기로 구성된다.

시공현장에서 빠른 시공속도와 장비가동효율을 극대화하기 위해 교반기 내에 설치되는 교반날을 현장교체할 수 있도록 하였고, 교반기 내부 청소가 용이하도록 교반기 본체를 개폐식으로 제작하였다.



그림 3-2-2-78. 박층포장 시공장비 시작품(스크류 방식) 전경

폴리머 콘크리트 재료를 적용하여 시작품을 시험가동해 본 결과, 자동배합시스템의 성능은 우수한 것으로 확인되었으나, 스크류 방식으로 구성된 교반기의 경우 긴 교반공간과 교반날 간의 이격공간 때문에 포장재료가 완전히 교반되지 못하고 침전물이 굳어 교반효율이 시간이 지날수록 떨어지는 문제가 발생하는 것으로 파악되었다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 스크류 방식의 교반기를 드럼 방식의 교반기로 교체하여 침전물 발생을 최소화함으로써 교반효율을 높일 수 있도록 하였다.



그림 3-2-2-79. 박층포장 시공장비 시작품(드럼 방식) 전경

(라) 시제품 개발

4차년도 잔여연구기간 동안 박층포장 시공장비 시작품 시험가동 결과를 토대로 시공장비의 핵심 요소인 자동배합시스템 개발이 최종 완료된 후에, 5차년도에는 차량에 자동배합시스템을 설치하고 포장재료 포설 및 자동 레벨링, 골재 칩핑 등의 시공과정을 통합적으로 수행할 수 있는 시제품을 개발할 계획이다.

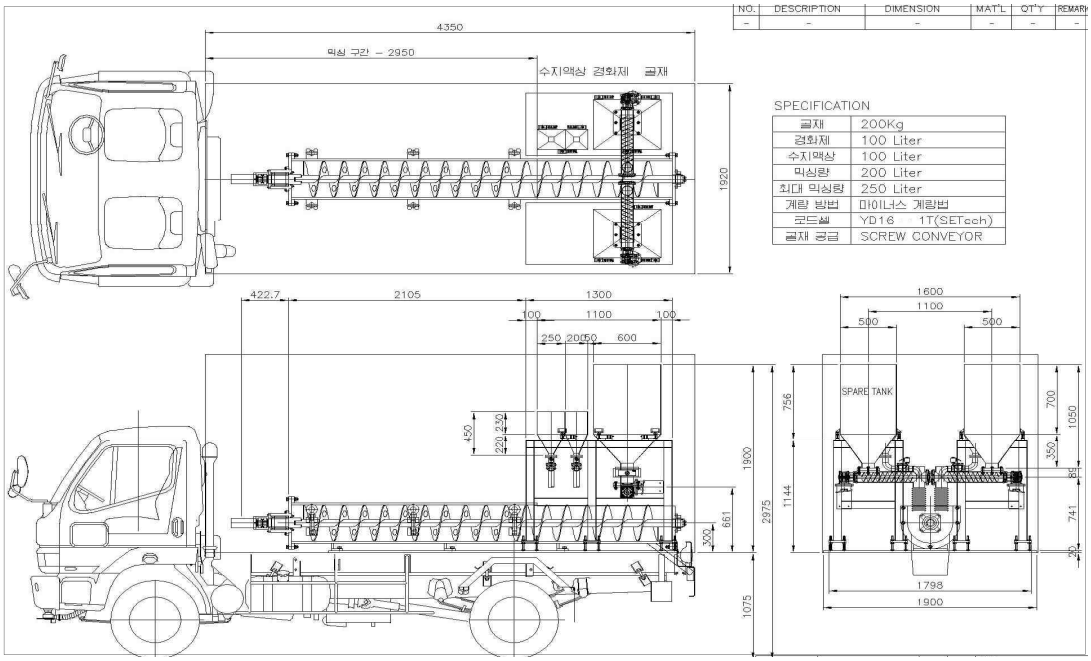


그림 3-2-2-80. 박층포장 시공장비 시제품 설계도

다. 박층포장의 장기공용 성능 평가

(1) 윤하중시험

본 과업에서는 윤하중시험을 이용하여 강상판 교면포장의 장기공용성을 평가하였다. 윤하중시험은 박층포장재료를 시공한 강바닥판 교량 구조물위에 실물규모의 중차량의 윤하중을 반복적으로 주행하여 박층포장재료의 공용수명과 강바닥판 교량의 구조적인 안정성을 평가하는 것이 목적이다.

폴리머콘크리트, 콘크리트계열, 아스팔트계열 3개 포장재료에 대한 시험체를 제작하였으며 보다 가속화된 시험을 위해 강바닥판의 두께는 14mm를 적용하였다. 시험체의 크기는 300×300cm, U리브의 두께는 8mm로 300mm 폭의 U리브 5개를 배치한 구조로 제작하였다. 시험 하중은 약 5톤이며 총 하중재하횟수는 30만회로 설정하였다. 하중재하길이는 200cm이며 폭 22cm의 Dual Tire를 사용하여 윤하중을 재하하였다.

LVDT와 Strain Gauge를 이용한 피로누적에 따른 강바닥판 처짐량 및 변형률 계측 결과를 통해 포장자체의 공용성능과 강바닥판 피로영향을 시험체별로 비교검증과 윤하중시험 종료 후, 각 시험체별로 부착강도, 미끄럼저항성, 평탄성, 소성변형, 균열 등의 항목에 대해 비교평가를 실시하였다.



그림 3-2-2-81. 윤하중시험 전경

포장균열결함 발생정도를 비교평가하기 위해 윤하중시험이 진행되는 동안 일정 하중재하 주기마다 균열 발생여부를 지속적으로 확인한 결과, 폴리머콘크리트 및 아스팔트 계열 시험체에서는 균열이 발생하지 않았으나 콘크리트 계열 시험체 제작과정에서 발생한 건조수축에 의해 초기 균열(13.45m)이 확인되었다. 이러한 균열은 하중 재하횟수의 증가와 함께 진전되어 하중재하 12만회시 30.3m, 하중 재하 22만회시 36.9m의 균열길이가 확인되었다.



<하중재하 69,800회> <하중재하 128,600회> <하중재하 240,600회>

그림 3-2-2-82.. 누적윤하중에 따른 균열 진전과정

소성변형결함의 경우 폴리머콘크리트 및 콘크리트 계열 시험체에서는 관찰되지 않았으나, 아스팔트 계열 시험체에서는 윤하중시험이 진행되는 동안, 총 9회에 걸쳐 동일한 위치에서 소성변형량을 측정하여 소성변형량의 변화 추이를 확인하였으며 최종 시험이 종료된 후 약 8mm의 소성변형이 발생한 것으로 나타났다.

윤하중시험 종료 후 각 시험체별로 휠패스 2개소, 비휠패스 1개소에 대해 부착강도 시험을 실시하였으며, 그 결과 폴리머콘크리트 계열>콘크리트 계열>아스팔트 계열 순으로 부착강도가 우수한 것으로 나타났다.



폴리머콘크리트 계열 콘크리트 계열 아스팔트 계열

그림 3-2-2-83. 부착강도 시험 후 단면

미끄럼저항성을 비교평가하기 위해 그림과 같이 BPT장비를 사용하여 각 시험체별로 시험한 결과, 폴리머콘크리트 계열>아스팔트 계열>콘크리트 계열 순으로 미끄럼 저항성이 우수한 것으로 나타났다.

평탄성을 비교평가하기 위해 아래 그림과 같이 워킹프로파일러 장비를 사용하여 각 시험체별로 시험한 결과, 폴리머콘크리트 계열>아스팔트 계열>콘크리트 계열 순으로 평탄성이 우수한 것으로 나타났으며, 신설 교면포장 IRI 기준인 2.0에 폴리머콘크리트 및 아스팔트 계열이 만족하는 것으로 나타났다.



그림3-2-2-84. BPT 시험 전경



그림 3-2-2-85. 노면평탄성 평가

표 3-2-2-7. 윤하중시험 결과

구분	폴리머콘크리트	아스팔트계열	콘크리트계열
윤하중시험 종료후 노면상태			
표면균열	발생하지 않음	발생하지 않음	균열 다수 발생 총 균열길이:36.9m
소성변형	발생하지 않음	약 8mm 발생	발생하지 않음
부착강도 (MPa)	2.89	3.13	0.47
미끄럼저항성 (BPN)	34	28	20
노면평탄성 (IRI)	1.81	1.94	2.86

(2) 피로실험

본 과업에서 개발된 박층포장을 초장대교량 사업단의 1핵심 과제에서 개발된 개선된 스캘럽부를 적용한 강바닥판 구조체에 적용하여 피로실험을 수행하였다. 박층포장 적용 전후의 강바닥판 거동을 분석하고 설계하중이 작용할 때의 박층 포장 강바닥판의 피로성능을 파악하고 피로설계를 고려한 박층 포장 자체의 성능 및 사용성을 분석하기 위하여 No.1 실험체를 이용하여 실험을 수행하였다. 그리고 강바닥판의 상부 강판두께(14mm와 16mm)에 따른 피로성능을 분석하기 위하여 강판두께가 서로 다른 No.2 실험체와 No.3 실험체를 이용하여 정적재하실험과 피로실험을 수행하였다. 실험체의 제원은 표 3-2-2-8과 같다.



그림 3-2-2-86. 피로실험 실험체 설치전경

표 3-2-2-8. 실험체 제원

구분	실험체명	크기(너비×폭×높이)	상판두께	포장 종류
1	No.1	3.52m×3.0m×0.5m	14mm	폴리머 콘크리트
2	No.2		14mm	폴리머 콘크리트
3	No.3		16mm	폴리머 콘크리트

No.1 실험체에 대해서 설계트럭하중이 작용하는 경우의 박층 포장 전·후에 대한 정적거동을 파악하고, 박층 포장 적용 강바닥판의 설계하중에 대한 피로성능을 파악하기 위하여 그림 3-2-2-87과 같이 설계트럭의 바퀴하중이 바닥판의 중앙부에 작용하도록 설계하였다.

No.1 실험체에 작용한 중앙 1점하중은 종리브 중앙부에 집중하중을 작용시키기 때문에 종리브의 재료항복을 유발하여 처음 의도한 3차원 실험체의 피로거동을 파악할 수 없는 것으로 나타났다. 따라서 종리브의 항복을 억제하면서 3차원 실험의 효과를 유도하기 위하여 그림 3-2-2-88과 같이 2점 하중을 작용시켰으며, 각 가로보에 전달되는 하중을 다르게 하여 양쪽 가로보에 서로 다른 응력범위를 유도할 수 있도록 비대칭 2점 하중을 작용시켰다. 이로써 양쪽 가로보의 스캘럽부에서 발생하는 응력의 크기를 달리할 수 있으며 대칭하중을 작용시키는 경우에 비하여 1개의 실험체로 2가지 피로실험 결과를 얻을 수 있는 경제적인 실험을 수행하였다.

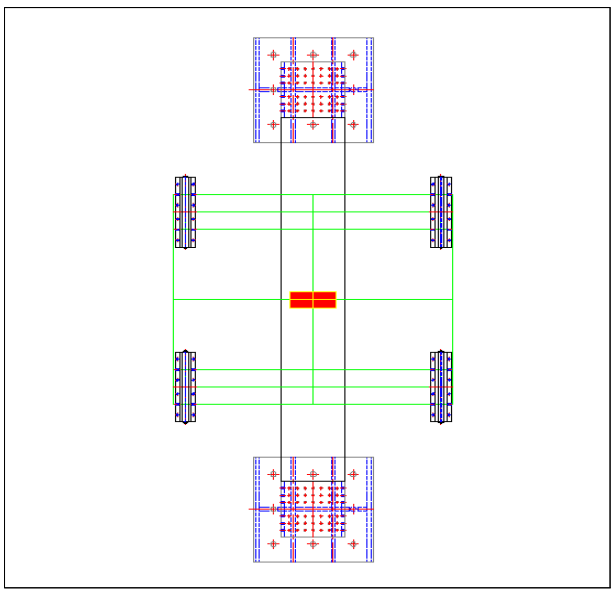


그림 3-2-2-87. 중앙 1점하중의
재하위치도

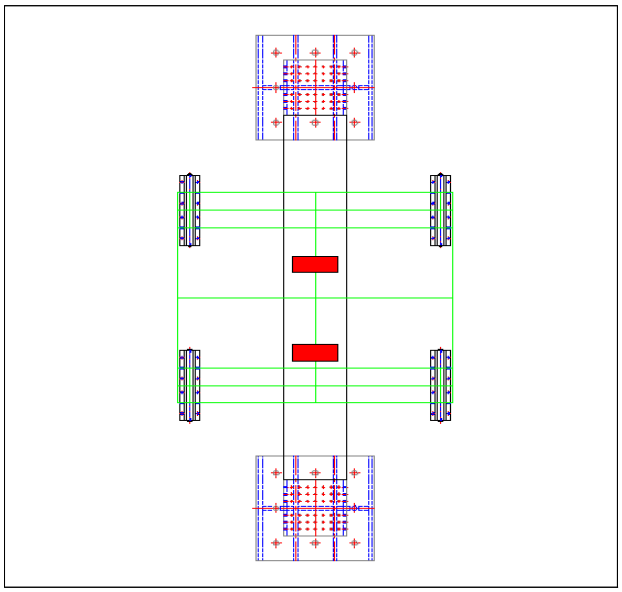


그림 3-2-2-88. 비대칭 2점하중의
재하위치도

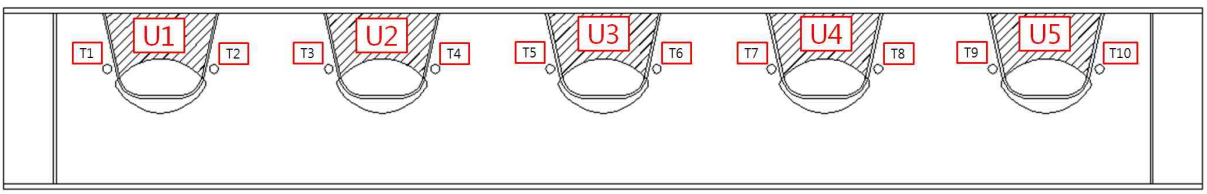


그림 3-2-2-89. 가로보 스캘럽부 센서 위치도

모든 실험체에 대하여 그림 3-2-2-89와 같이 가로보 스캘럽 주변의 응력집중 예상위치에 변형률게이지를 부착하고 강바닥판 중앙부의 종리브에 발생하는 처짐과 변형률을 측정하기 위하여 변위계와 변형률게이지를 설치하였다.

강바닥판 상부 박층 포장의 적용 여부에 따른 비교분석을 위하여 No.1 실험체를 포장 전과 포장 후로 나누어 재하실험을 수행하였다. 본 실험에서는 0.4mm/min의 속도로 하중을 증가시켰으며 같은 실험하중에 대하여 3회 또는 4회의 반복실험을 수행하였다. 실험 최대하중인 300kN을 작용시킨 경우에 발생한 변위는 표 3-2-2-9와과 같다. 포장 전의 평균 변위는 5.28mm이고 포장 후에 발생한 평균 변위는 5.18mm이며, 포장 전에 비해 포장 후의 변위가 0.1mm 감소하는 것으로 나타

났다. 따라서 박층 포장을 적용한 후의 실험체 강성이 미소하게 증가한 것으로 파악되었으며 이는 포장체와 강바닥판 실험체의 부착면도 일체화되어 강성이 증가하는 효과를 발휘한 것으로 판단된다.

표 3-2-2-9. No.2 실험체 박층 포장 전후의 변위 비교

구분	최대하중(kN)	최대변위(㎜)	
		포장 전	포장 후
1	300	5.30	5.19
2		5.30	5.17
3		5.25	-
평균		5.28	5.18

박층 포장 전후의 정적재하실험이 끝난 No.1 실험체를 이용하여 피로실험을 수행하였다. 피로실험은 우리나라 도로교설계기준에서 규정하고 있는 설계하중과 설계방법에 근거하여 계획되었으며 200만회 일정진폭 피로실험을 수행하였다. 그 후에 다시 유럽의 설계기준을 반영하여 500만회 일정진폭 피로실험까지 연속적으로 수행하였다. 피로실험의 하중범위는 46kN ~ 200kN이고 평균 약 3Hz 정도의 반복속도로 피로실험을 진행하였다. 피로실험 결과 가로보 스캘럽부를 비롯한 어떤 위치에서도 균열이 발생되지 않았음을 확인할 수 있었다. 그리고 일정한 주기로 박층 포장의 이상 유무도 같이 확인한 결과, 포장체 균열이나 탈락 등의 문제는 발생하지 않았다. 따라서 본 연구에서 대상으로 한 박층 포장 강바닥판은 설계하중에 대하여 500만회 피로성능과 사용성을 충분히 확보하고 있는 것으로 파악되었다.

강바닥판의 상판 두께에 따른 피로성능을 분석하기 위하여 비대칭 2점 하중을 작용시켜 상판 두께가 14mm와 16mm인 실물모형 강바닥판 실험체에 대한 피로실험을 수행하였다. 피로실험은 3단계로 나누어 진행하였다. 1단계에서는 반복하중의 범위를 50kN ~ 750kN으로 하여 21만회까지 피로실험을 수행하였고 2단계에서는 하중범위를 50kN ~ 1,050kN으로 하여 50만회 피로실험을 수행하였으며, 3단계에서는 2단계와 같은 하중범위로 30만회 피로실험을 수행하였다. 그 결과 양단 가로

보의 스캘럽부 또는 스캘럽과 인접한 용접부에서 균열이 발생하였으며 그 발생 위치를 표 3-2-2-10과 표 3-2-2-11에 나타내었다. 그림 3-2-2-90, 3-2-2-91, 3-2-2-92 및 3-2-2-93은 1단계의 하중범위를 2단계 하중범위로 환산하여 초기균열이 발생하기까지의 총 누적 반복회수를 나타낸 것이다.

표 3-2-2-10. No.2 실험체 피로실험 결과

단계	하중범위 (kN)	반복횟수 (cycle)	균열 발생 위치	
			강바닥판	박층 포장
1	50 ~ 750	210,000	균열 없음	균열 없음
2	50 ~ 1,050	133,000	CB2-U4-T7	균열 없음
		158,000	CB2-U5-T10	균열 없음
		208,000	CB2-U5-T9	균열 없음
		260,000	CB1-U4-T7	균열 없음
		500,000	추가 균열 없음	균열 없음
3	50 ~ 1,050	60,000	CB1-U3-T6 CB1-U5-T9 CB2-U3-T6	균열 없음
		81,000	CB2-U3-T5	균열 없음
		192,000	CB1-U2-T4 CB2-U4-T8	균열 없음
		300,000	추가 균열 없음	균열 없음

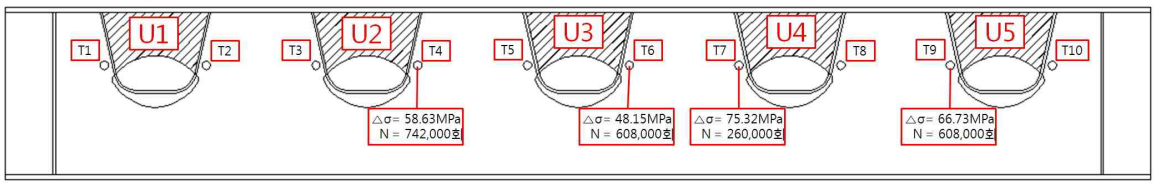


그림 3-2-2-90. No.2 실험체 피로균열 발생위치의 응력범위 및 반복회수(CB1)

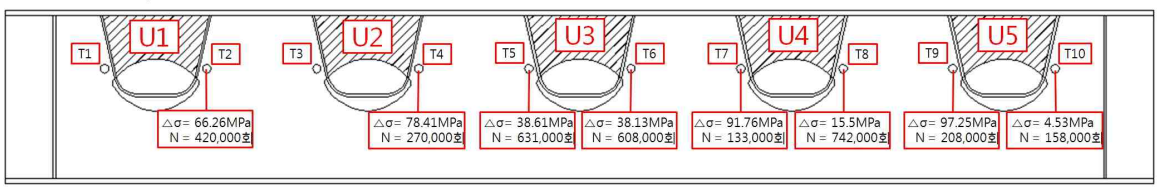


그림 3-2-2-91. No.2 실험체 피로균열 발생위치의 응력범위 및 반복회수(CB2)

표 3-2-2-11. No.3 실험체 피로실험 결과

단계	실험조건 (kN)	반복횟수 (cycle)	균열 발생 위치	
			강바닥판	박층 포장
1	50 ~ 750	210,000	균열없음	균열 없음
2	50 ~ 1,050	50,000	CB2-U4-T7 CB2-U5-T9	균열 없음
		200,000	CB2-U1-T2	균열 없음
		220,000	CB2-U2-T4	균열 없음
		370,000	CB1-U5-T9	균열 없음
		460,000	CB1-U4-T7	균열 없음
		500,000	추가 균열 없음	균열 없음
3	50 ~ 1,050	160,000	CB1-U3-T6	균열 없음
		240,000	CB1-U1-T1	균열 없음
		410,000	CB1-U3-T5	균열 없음
		650,000	추가 균열 없음	균열 없음

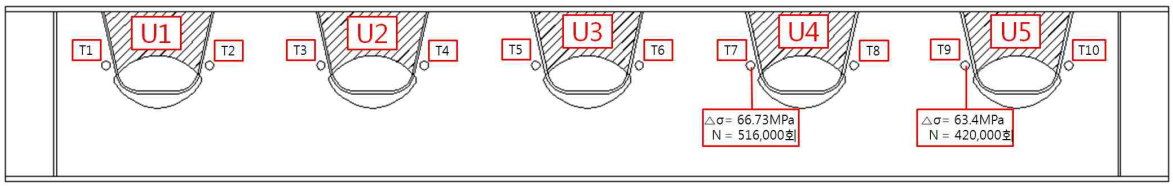


그림 3-2-2-92. No.3 실험체 피로균열 발생위치의 응력범위 및 반복회수(CB1)

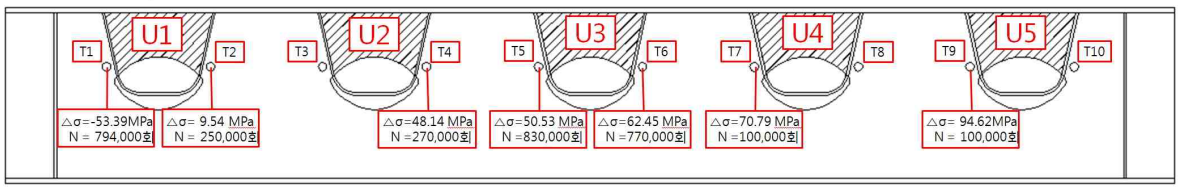


그림 3-2-2-93. No.3 실험체 피로균열 발생위치의 응력범위 및 반복회수(CB2)

강바닥판의 상판 두께에 따른 피로성능을 분석하기 위해서는 CB2보다는 CB1에 발생한 피로균열 발생회수를 비교하는 것이 합리적으로 판단된다. No.2 실험체와 No.3 실험체에 적용한 비대칭 하중의 한쪽은 2번 가로보(CB2) 상부에 직접적으로

작용하는 경우와 비슷하여 상판의 두께에 따른 영향이 거의 나타나지 않기 때문이다. 따라서 하중의 작용위치가 상대적으로 먼 거리에 위치한 1번 가로보(CB1)에 대하여 피로균열 발생수명을 분석하였다. 앞의 표 2-2-24와 표 2-2-25에서 1번 가로보(CB1)에 발생한 피로균열을 비교해 보면, 상판 두께가 14mm인 No.2 실험체의 초기 피로균열은 260,000회의 반복회수에서 발생하고 상판 두께가 16mm인 No.3 실험체에서는 초기 피로균열이 370,000회에서 발생하였다. 그리고 같은 위치에서 발생한 균열을 비교해볼 때 No.2 실험체 보다는 No.3 실험체의 반복회수가 더 크게 나타났다. 따라서 강바닥판의 상판 두께가 14mm인 경우보다는 16mm 강바닥판의 피로성능이 더 우수한 것으로 파악되었다.



그림 3-2-2-94. No.2 실험체 피로균열 (CB1-U4-T7)



그림 3-2-2-95. No.3 실험체 피로균열 (CB1-U4-T7)

피로실험을 진행하면서 포장상태의 이상 유무를 일정한 주기로 육안으로 확인한 결과, 포장체 균열이나 부착 불량 등의 문제점은 발생하지 않았다. 따라서 박층포장의 장기공용성능에 문제가 없는 것으로 판단된다. 그림 3-2-2-96은 피로실험 종료 후 포장상태를 나타낸다.

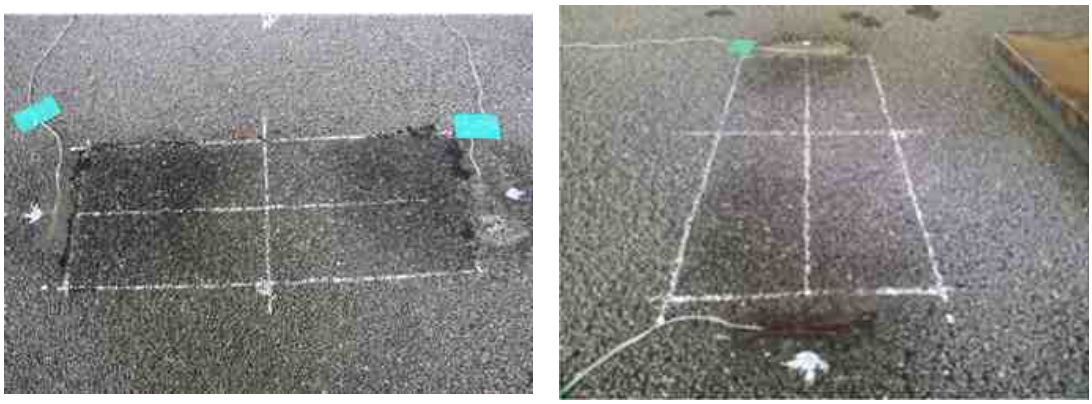


그림 3-2-2-96. 피로실험 종료 후 포장상태

라. 경제성 분석

(1) 박층포장의 경제성 분석

LCC 분석이란 기본적으로 대안이 갖는 분석기간 동안 시간의 경과에 따라 어떠한 경제적 영향을 만들어 내는 가를 평가하는 것이다. 즉 서로 다른 상이한 시점에서 발생되는 비용을 어느 기준점에서 동일한 화폐가치로 환산하여 산술적 합계를 통해 평가하고자 하는 것이다. 그러나 미래에 발생되는 비용은 불확실한 시간가치로 인해 인플레이션에 따른 화폐가치의 변동이 발생하고 이러한 미래비용의 지불규모를 분석하기 위해 현재와 미래 비용을 공통시점으로 환산하여 분석하는 일반적인 방법으로 현재가치법과 년등가액법이 이용된다. 본 연구에서는 Huang(2004)이 제안한 현재가치법을 사용하여 LCC를 산정하였다.

LCC 분석을 위한 기간이나 대안들은 합리적인 설계전략과 관련된 장기비용의 차이를 반영하여 평가할 수 있도록 충분한 시간범위를 두도록 하고 있다. FHWA에서는 1996년 9월에 LCCA 정책설명에서 모든 포장계획(신설, 복구, 재포장)에 최소 35년이라는 분석기간을 권장하면서 분석기간 범위는 30~40년이 타당한 것으로 보고하고 있다. 본 연구에서는 분석기간을 40년으로 설정하여 수행하였다.

할인율의 결정은 물가상승률과 이자율의 정확한 예측이 전제되어야 하나 이는 국내의 중·장기 경제전망에 대한 자료부족과 과거의 경제자료 또한 생동적인 경제동향을 추정하기 곤란한 점 등으로 매우 어려운 문제이다. 즉 초기투입 비용과

장기간에 걸쳐 발생하는 유지관리 및 보수비용 그리고 수익 등의 효과를 고려하는데 있어 할인율의 변화에 따라 LCC 분석결과가 상당히 민감하게 작용한다. 따라서 본 연구에서는 1997년 이후의 과거 경제지표로부터 소비자 물가지수와 시중은행의 정기예금금리에 의해 구한 실질할인율을 산정하였다. 실질할인율을 구하기 위한 한국은행 경제통계시스템에서 제공하는 경제조사자료를 1997년부터 2011년까지의 실질할인율 산정으로서 2.18%을 산정하였다. 여기서 명목할인율은 정부에서 발행하는 장기채권의 이율을 사용하는 것이 원칙이나, 우리나라는 미국 등 선진국과 같이 정부가 채권시장의 이율은 주도하고 있지 못하기 때문에 시중의 보통은행에서 제시하는 정기예금금리를 사용하였다.

표 3-2-2-12. 실질할인율 (한국은행 경제통계시스템(www.korea.go.kr))

년 도	정기예금금리(%)	물가상승률(%)	실질할인율(%)
1997	10.59	4.4	5.93
1998	13.39	7.5	5.48
1999	7.05	0.8	6.20
2000	7.08	2.3	4.67
2001	5.46	4.1	1.31
2002	4.71	2.8	1.86
2003	4.15	3.5	0.63
2004	3.75	3.6	0.14
2005	3.57	2.8	0.75
2006	4.36	2.2	2.11
2007	5.01	2.5	2.45
2008	5.67	4.7	0.93
2009	3.23	2.8	0.42
2010	3.18	3	0.17
2011	3.69	4	-0.30
평균	5.66	3.4	2.18

일반적인 아스팔트 교면포장의 유지보수는 아스팔트 표층 4cm 절삭 후 덧씌우기 재포장이 시행되고 있는데, 이는 평탄성 등의 기능적인 시스템 수준을 향상 혹은 유지시키고 있을 뿐이다. 그러나 이러한 접근 방법은 재포장의 횟수가 거듭될수

록 기존 포장도로를 조기에 파손시키며 노후화를 촉진시키는 요인을 제공하고 있다. 임영환(2003)의 연구에 따르면 일반국도의 경우, 최초 포장 이후 1차 덧씌우기까지의 공용연수는 평균 6년 정도이며, 1차 덧씌우기 후 2차 덧씌우기까지가 평균 3년, 3차부터 4차까지가 2년 정도의 기간이 소요되었다. 즉, 덧씌우기 횟수가 증가함에 따라서 차후 유지보수까지의 포장의 소요수명이 점차 줄어드는 경향을 나타내었다. 이는 획일적인 구역 차원(Network Level)의 유지보수나 포장의 파손과 손상에 대한 구간별(Project Level) 유지보수가 아닌 일률적인 표층 재포장만이 시행됨에 따라 포장수명이 점차적으로 감소하고 있는 것으로 볼 수 있다.

따라서 본 연구에서는 LCC 비용 산정에 있어 임영환(2003)의 연구에서 보여주는 형태의 공용수명을 이용하여 LCC를 산정하였다. 그러나 본 연구에서는 장경간 강상판 케이블교량용 포장재료에 대한 LCC 검증으로서 초기공용수명은 8년으로 산정하고 이후 절삭 덧씌우기에 대해서는 공용수명을 6년으로 산정하기로 하였다.

덧씌우기에 따른 사용자비용은 미국 FHWA의 LCC 프로그램인 RealCost에 근거해서 19,250원/h로 산정하였다. 따라서 차량한대가 한 시간 지체함에 따라 19,250원의 사용자비용이 든다고 본다. 일일교통량이 40,000대인 경우 공사 및 우회에 따른 지체시간으로 평균 30분으로 산정한다면 삼억팔천오백만원의 사용자비용이 발생한다. 총 공사구간의 면적을 100아르로 가정한다. 따라서 1아르에 대한 금액은 1/100의 금액인 삼백오십만원이다. 본 연구에서는 절삭, 유지관리비, 철거 및 폐기비용에 대해서는 고려하지 않는다.

기존의 PSMA+구스아스팔트 포장 시스템과 박층 PSMA+매스틱 아스팔트 시스템의 경우는 첫 번째 공용기간을 8년으로 그 이후에는 6년으로 LCC를 산정하였으며 폴리머 콘크리트의 경우에는 공용기간을 20년으로 산정하였다. 폴리머 콘크리트의 반영구적인 공용성을 고려해 10년마다 덧씌우기를 적용하여 유지보수의 차원에서 수행하는 것으로 고려하였다.

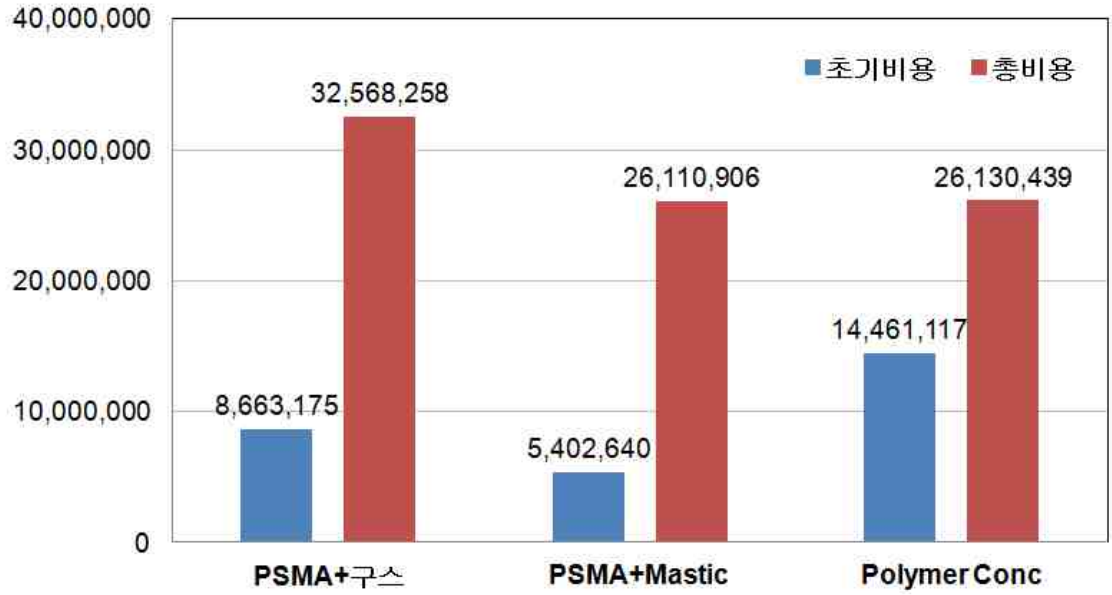


그림 3-2-2-97. LCC 분석을 통한 공법별 비용 비교

경제성분석 결과, LCC 관점에서 우수한 공법은 PSMA+매스틱 아스팔트 공법, 폴리머 콘크리트 공법으로 기존 PSMA+구스 아스팔트 공법에 비해 약 20% 경제적인 것으로 확인되었다. 초기시공비용은 PSMA+매스틱 공법이 가장 경제적인 것으로 확인되었다.

(2) 기타 경제적 효과

위와 같이 장경간 케이블교량에 본 연구에서 개발된 박층포장을 적용함으로써 포장의 LCC를 감소시킬 수 있다. 또한 박층포장을 적용하여 전체 교량의 고정하중을 감소시켜 공사비를 절감할 수 있다.

이탈리아의 메시나대교(Messina Strait Bridge)의 교면포장은 아스팔트 포장계열의 박층포장으로 당초 설계되었으나 교량의 고정하중을 감소시키기 위해 대안공법으로 10~12mm의 폴리머콘크리트 계열의 초박층포장을 검토하였다. 메시나대교의 경우 교면포장의 면적이 약 100,000m^2이며 여기에 박층포장을 적용하면 고정하중이 약 6,000ton 이상 감소된다(Henrik 등, 2012). 여기서 고정하중이 약 6,000ton 감소하면 강케이블 중량도 7,200ton 이상 감소하게 되며 추가적으로 주탑과 앵커리지 등의 구조물이 경량화된다(Lars 등, 2009).

현재 일반적으로 장대교량에 사용되고 있는 포스트텐셔닝 강케이블의 자재비는 1,600,000원/ton, 시공비 700,000원/ton으로 총 시공비용은 2,300,000원/ton이다. 따라서 7,200ton의 강케이블 중량 감소시 이는 7.2ton/a의 비율로 강케이블 중량이 감소하고 강케이블 시공비용면에서 16,560,000원/a의 절감효과가 있다. 이러한 절감효과를 LCC분석에 적용시 박층포장 시공비용과 강케이블 절감비용을 합산하여 22,818,000원/a의 총 시공비용이 산출됨에 따라 기존 교면포장 총시공비와 비교하여 약 9,750,000원/a의 비용 절감이 가능하게 된다.

따라서, 박층포장 적용시 시공비용의 30% 이상의 절감효과가 있음을 확인할 수 있으며 고정하중 경감에 따라 추가적으로 주탑과 앵커리지 등의 구조물이 경량화되기 때문에 교량 전체의 경제성에도 크게 영향을 주어 포장 시공비 절감효과를 상회하는 추가적인 경제성 확보가 가능하다.

마. 현장시험시공

박층 폴리머 콘크리트 공법을 현장에 적용하여 시공성 및 공용상태를 검토하기 위하여 2012년 12월 중앙고속도로 춘천방향 172km 폐도구간에 13m 연장의 현장시험시공을 실시하였다. 본 시험시공은 콘크리트 포장 위에 강바닥판을 설치하고 박층 폴리머 콘크리트를 시공하였으며 인력포설방식을 사용하여 그림 3-2-2-98과 같은 순서로 실시하였다.



1. 노후포장 절삭



2. 절삭면 정리



3. 강판설치 및 접착층 시공



4. 포장재료 혼합



5. 혼합물 포설 및 레벨링



6. 모서리 및 표면정리



7. 골재 칩핑



8. 잔여골재 청소



9. 시공완료

그림 3-2-2-98. 현장시험시공 공정

포장두께 12mm의 박층 폴리머 콘크리트 포장을 대기온도 5~10℃, 습도 60% 상태의 동절기 환경조건에서 시공 완료하였다. 저온의 악조건에서도 박층포장재료의 시공성 및 작업성에 문제가 없이 정상적으로 진행되었다.



그림 3-2-2-99. 현장시험시공 전경

향후 일정 공용기간이 경과한 후 시험시공 구간에 대한 지속적인 추적조사를 실시할 계획이다. 워킹프로파일러를 이용하여 노면평탄성을 조사하고 부착강도시험기를 이용하여 부착강도를 확인하며 육안조사를 통하여 포장의 결함을 확인한다.



그림 3-2-2-100. 노면평탄성 조사



그림 3-2-2-101. 부착강도 시험

바. 박층포장 자동시공장비 개발

본 연구에서 연구개발 중인 장경간 강바닥판 케이블교량용 박층포장재료 및 시스템을 실제 교면포장에 적용하기 위한 이용기술개발의 일환으로 박층포장 시공장비 개발을 동시에 진행하였다. 앞선 실내 시험 및 장기공용성 평가 결과 내후성과 내마모성, 내구성 등의 측면에서 폴리머 콘크리트 재료가 매우 우수한 것으로 나타났다. 또한 콘크리트 계열 재료를 강바닥판 교면포장에 적용하는 기술을 고안하여 접착층으로써 폴리머 콘크리트를 적용했을 경우의 장기공용성을 검증한 결과, 우수한 공용성능을 보이는 것으로 나타났다. 하지만 현재 국내에서는 폴리머 콘크리트 재료에 대한 규격화된 시공장비가 존재하지 않아 지금까지는 단순 교반기를 이용한 인력시공에 의존하여 시공된 바 있다. 폴리머 콘크리트의 강도 발현 및 작업성, 시공성은 정밀도 높은 배합비 준수와 배합과정 및 시공과정의 정확도에 따라 크게 좌우되기 때문에, 규격화된 시공장비 없이 인력시공에 의존할 경우 다양한 시공조건 및 시공기술자의 경험에 따라 시공결과가 크게 달라질 수 있는 문제점이 있다. 따라서 폴리머 콘크리트 자동시공장비 개발의 필요성에 따라 본 연구에서는 폴리머 콘크리트 계열 포장재료를 대상으로 한 자동화 교반시스템 개발을 통해 배합 및 교반, 포설, 레벨링 등의 일련의 시공과정을 통합하여 기계화 시공이 가능하도록 박층포장 시공장비 개발을 진행한다.

4차년도 연구를 통해 시작품을 제작하여 시험운영을 거쳐 보완된 박층포장 자동시공장비 시제품은 그림 23의 설계도면과 같이 실규모로 자동배합시스템 시제품 설계 및 제작을 진행하여 시험운영을 거친 후, 주행제어시스템, 자동레벨링시스템 등의 모든 시스템을 일체화하여 시공장비 차량에 설치함으로써 박층포장 시공장비 사업화제품 개발을 완료한다. 그림 3-2-2-102에서 보는 바와 같이 이미 자동배합시스템 및 주행제어시스템은 차량에 일체화하여 1차 성능시험을 완료하였다.

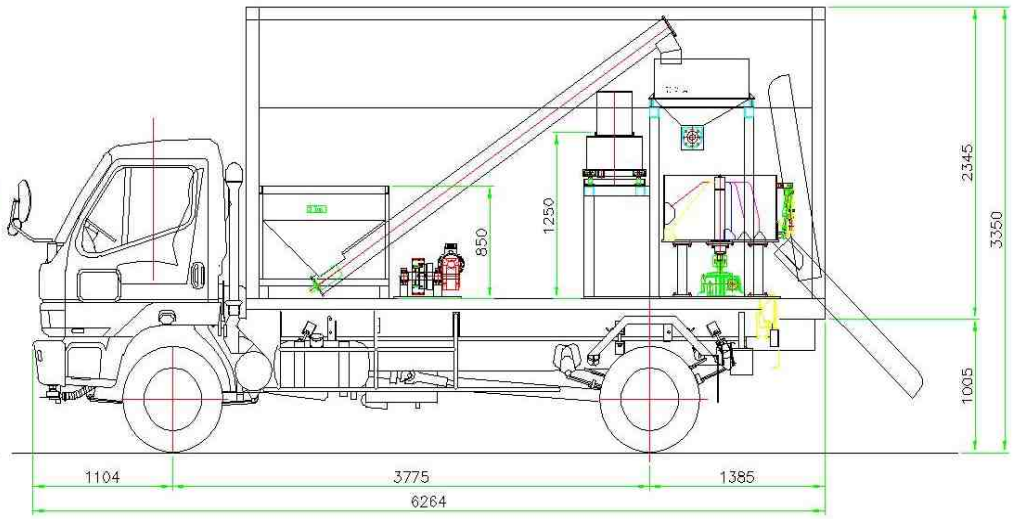


그림 3-2-2-102. 박층포장 자동시공장비 시제품 설계도



그림 3-2-2-102. 박층포장 자동시공장비 시제품 전경

박층포장 자동시공장비의 메인 구성시스템인 자동배합시스템은 1배치 기준으로 최고 400kg 중량에 해당하는 폴리머 콘크리트 혼합물을 교반 및 포설할 수 있는 성능을 가지며, 짧은 시간에 1배치 물량을 계량 및 교반하여 포설까지 연속적으로 이루어진다. 이는 기존 교면포장재료인 구스+SMA 포장의 하루 시공가능물량인 1,200m^{2}에 비해 약 3배 이상 향상된 3,600m^{2}에 해당하는 시공물량을 소화할 수 있는 성능을 가진다.

박층포장 시공장비 자동계량 및 교반시스템에 대한 시험운영을 그림 25와 같이 시행하여 계량 정밀도와 교반 및 포설까지의 소요시간을 확인하고, 믹서 교반성능과 포설속도 등을 확인하였다. 그 결과 경화제 공급 속도가 상대적으로 느리고 저장탱크 용량이 부족한 부분에 대해 보완대책을 세워 개선작업을 진행하였으며,

동시에 자동레벨링시스템 제작 및 일체화 작업을 수행하였다.



그림 3-2-2-104. 박층포장 자동시공장비 시험운영 전경

사. 품질관리 및 시공지침 정립

본 연구에서 개발된 폴리머 콘크리트와 매스틱 아스팔트, 박층 PSMA의 균질한 품질관리와 시공성능 향상을 위해 품질관리 및 시공지침을 구축하였다. 현재 국내에서 적용되고 있는 도로공사 표준시방서(국토해양부), 고속도로공사 전문시방서(한국도로공사), 교면포장 설계 및 시공 잠정지침(국토해양부), 미국 AASHTO, ACI 지침사항 등을 비교 분석하여 참고하였다.

본 연구과정에서 수행된 실내시험 결과 및 시험시공 결과를 토대로 시공지침(안)을 작성하였으며 총칙, 강바닥판 교면포장 일반, 재료, 시공 등의 순서로 구성된다. 작성된 지침(안)은 한국도로교통협회 도로분야 국가기준 관리주체를 통한 지침 초안의 기술자문을 진행하여 그림 2-2-84과 같이 보완 작업을 수행하였으며 폴리머 콘크리트, 아스팔트 포장의 전문가에 대해 추가적인 기술자문을 수행하였다.

<table>
<tr><th>로드코리아 제정 자침 안</th><th>한국도로교통협회 검토 안</th><th>사유(근거)</th></tr>
<tr><td>

<표 3.5> 개질 아스팔트 바인더 품질기준

항 목		규 격 치	시 험 법
침입도(25℃) 1/10mm		60~100	KS M 2252
연화점 ℃		55~65	KS M 2250
신장도 (10℃) cm		50 이상	KS M 2254
터프니스 (25℃) kg/cm		120이상	
테너시티 (25℃) kg·cm		100 이상	
점도	60℃ 포아즈	4,000 이상	KS M 2248
	160℃ SFS	500 이하	
	200℃ SFS	200 이하	
인 화 점 (C.O.C) ℃		280 이상	KS M 2253
회 분 %		1.0 이하	KS M 2006
비 중 (25℃/25℃)		1.0 이상	KS M 2002
박막가열 (180℃, 2.5시간)후	증발량 %	0.3 이하	KS M 2258
	잔류침입도 %	65 이상	
	연화점 %	80~110	
후라스취화점 ℃		-12 이하	

마. 골재

1) 굵은 골재

골재는 모암의 암종에 따라 아스팔트와의 피복 특성이 다르게 나타나므로 지역적인 기후조건에 의해 포장의 박리 현상이 우려되는 도로에서는 골재와 아스팔트 사이의 부착성이 양호한 골재를 선정해야 한다.

굵은 골재는 아래 표의 품질 규정을 만족해야 한다. 단, 현장 경험이나 실내 시험 등으로 소요품질의 포장이 얻어질 수 있을 경우에는 규정에 적합하지 않은 골재도 감독자의 판단에 의해 사용할 수 있으며, 사용 목적에 따라 경제성을 고려하여 선정 한다.

교면포장에 적용할 가열 아스팔트 혼합물용 굵은 골재는 1등급 단입도 골재를 사용한다. 교통하중 등급(ADT)이 8.2톤 등가단축 하중(ESAL) 기준으로 250대/Lane/일 이하일 경우에는 2등급 단입도 골재(편장석률 20% 이하)를 적용할 수 있다.

</td><td>

<표 3.5> 개질 아스팔트 바인더 품질기준

항 목		규 격 치	시 험 법
침입도(25℃) 1/10mm		60~100	KS M 2252
연화점 ℃		55~65	KS M 2250
신장도 (10℃) cm		50 이상	KS M 2254
터프니스 (25℃) kg/cm		120이상	
테너시티 (25℃) kg·cm		100 이상	
점도	60℃ 포아즈	4,000 이상	KS M 2248
	160℃ SFS	500 이하	
	200℃ SFS	200 이하	
인 화 점 (C.O.C) ℃		280 이상	KS M 2253
회 분 %		1.0 이하	KS M 2006
비 중 (25℃/25℃)		1.0 이상	KS M 2002
박막가열 (180℃, 2.5시간)후	증발량 %	0.3 이하	KS M 2258
	잔류침입도 %	65 이상	
	연화점 %	80~110	
후라스취화점 ℃		-12 이하	

마. 골재

1) 굵은 골재

골재는 모암의 암종에 따라 아스팔트와의 피복 특성이 다르게 나타나므로 지역적인 기후조건에 의해 포장의 박리 현상이 우려되는 도로에서는 골재와 아스팔트 사이의 부착성이 양호한 골재를 선정하여야 한다.

굵은 골재는 <표 3.6>의 품질 규정에 적합하여야 한다. 단, 현장 경험이나 실내 시험 등으로 소요품질의 포장이 얻어질 수 있을 경우에는 규정된 기준에 미달되는 골재도 감독자의 판단에 의하여 사용할 수 있으며, 사용 목적에 따라 경제성을 고려하여 선정하여야 한다.

교면포장에 적용할 가열 아스팔트 혼합물용 굵은 골재는 1등급 단입도 골재를 사용한다. 교통하중 등급(ADT)이 8.2톤 등가단축하중(ESAL) 기준으로 250대/Lane/일 이하일 경우에는 2등급 단입도 골재(편장석률 20 % 이하)를 적용할 수 있다.

</td><td>

[수정] KS M 2253 폐지된 규격임

[수정] KS M 2006 폐지된 규격임

[수정] 문구 수정

[수정] 문구 수정 : "규정에 적합하지 않은 골재"는 사용 불가이므로 문구수정 필요

→ "규정된 기준에 미달되는 골재도"

</td></tr>
</table>

그림 3-2-2-105. 품질관리 및 시공지침 신구대비표

아. 요약 및 결론

(1) 박층포장재료 개발

장경간 강바닥판 케이블교량용 박층포장재료의 개발을 위하여 물성시험, 내구성시험, 실내공용성시험, 소규모 장기공용성평가시험을 실시하였으며, 윤하중시험 수행을 위한 계획을 수립하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 폴리머콘크리트 계열 박층포장재료의 물성을 평가하기 위하여 저온휨시험, 인장강도시험, 부착강도시험, 선수축률 및 열팽창계수시험을 실시하였으며, 아스팔트콘크리트 계열 박층포장재료의 물성을 평가하기 위하여 저온휨시험, 휠트래킹시험, 부착강도시험, 수분손상시험, 열팽창계수시험과 관입량시험, 유동성시험, 휠트래킹시험을 실시하였으며, 시멘트콘크리트 계열 박층포장재료의 물성을 평가하기 위하여 휨강도시험, 압축강도시험, 부착강도시험, 건조수축시험을 실시하였다. 또한 물성시험결과와 옥외폭로시험을 통하여 간적접으로 평가한 시공성, 및 경제성을 감안하여 박층포장재료의 1차 후보를 선정하였다.

- 폴리머콘크리트 계열 박층포장재료의 내구성을 평가하기 위하여 동결융해시험, 촉진내후성시험, 염소이온 침투저항성시험을 실시하였으며, 시험 전후의 휨강도, 인장강도, 압축강도, 탄성계수를 측정하여 내구성능을 비교하였다.
- 폴리머콘크리트 계열 박층포장재료의 실내공용성을 평가하기 위하여 빔피로시험을 실시하였으며, 강바닥판 교면포장의 표층으로 적용하고 있는 PSMA와의 비교를 통하여 공용성능을 검토하였다.
- 다양한 박층포장재료의 소규모 장기공용성을 평가하기 위하여 소규모 장기공용성시험을 실시하였으며, 초기파손발생시 하중재하횟수를 측정하여 공용성능을 비교하였다.
- 다양한 박층포장재료의 장기공용성과 교량구조물의 구조적 안정성을 평가하기 위하여 실제 규모의 윤하중시험에 대한 계획을 수립하였으며, 잔여연구기간 동안 시험을 실시할 예정이다.

(2) 이용기술 개발

장경간 강바닥판 케이블교량용 박층포장재료 이용기술의 개발을 위하여 구조해석을 실시하였으며, 박층포장재료 시공장비의 시작품을 제작하고 시제품 제작을 위한 설계를 완료하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 강바닥판 교면포장의 박층화에 따라 발생할 수 있는 피로유발을 포함한 문제점을 파악하기 위해서 다양한 박층포장공법 및 강바닥판 두께의 변화를 주어 구조해석을 실시하여 포장부와 강바닥판에서 발생할 수 있는 인장변형률을 비교 검토하였다.
- 폴리머콘크리트를 구성하는 주제, 경화제, 골재를 일정 배합비율로 정밀배합하여 교반작업을 수행하는 자동배합시스템에 대한 시작품 제작 후, 시험가동을 통해 보완사항을 검토하였다.
- 박층포장 시공장비 시작품 시험가동결과를 토대로 교반기를 보완하여 포장재료 포설, 레벨링, 골재칩핑 시스템을 통합하여 시제품 설계를 수행하였다.

(3) 소형포장가속시험기 개발

- 하중구동시스템, 주행시스템, 환경모사시스템과 이러한 시스템을 제어할 수 있는 통합제어시스템으로 구성된 소형포장가속시험기 시제품을 제작 완료하였다.
- 시험운영 및 현장시험적용을 통해 보완사항을 검토하여 최종적으로 상용제품 제작을 위한 과정을 진행 중에 있다.