

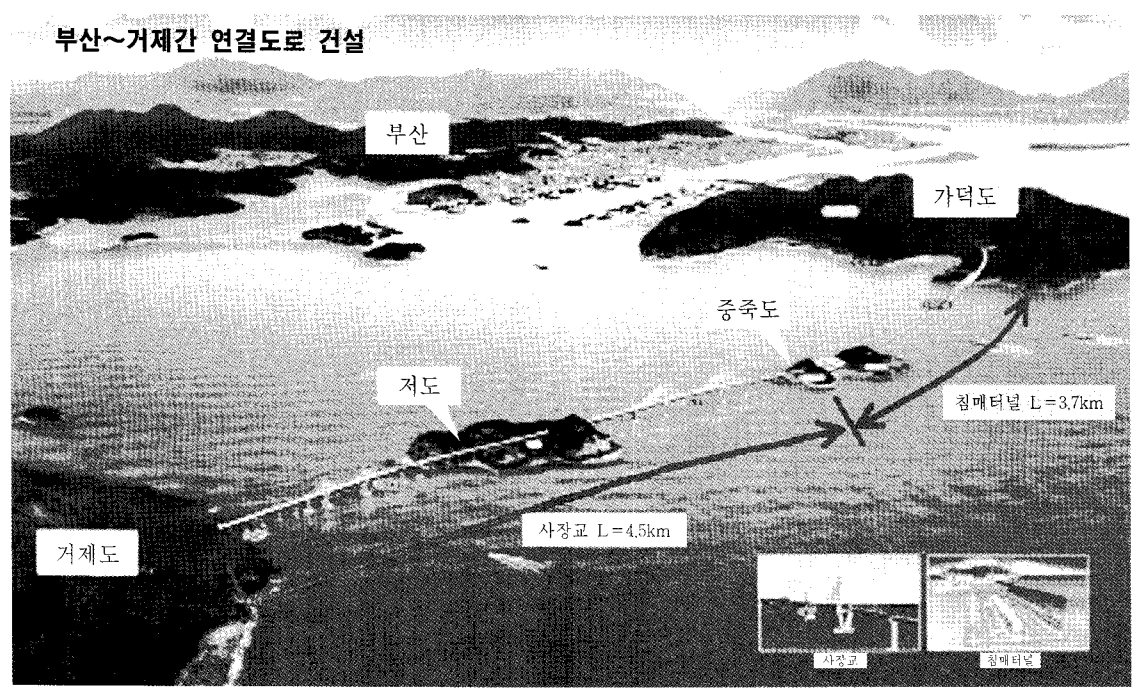
부산-거제간 연결도로 침매터널의 콘크리트 내구성 설계

이 정 상 ((주)대우건설 GK사업관리팀 과장)

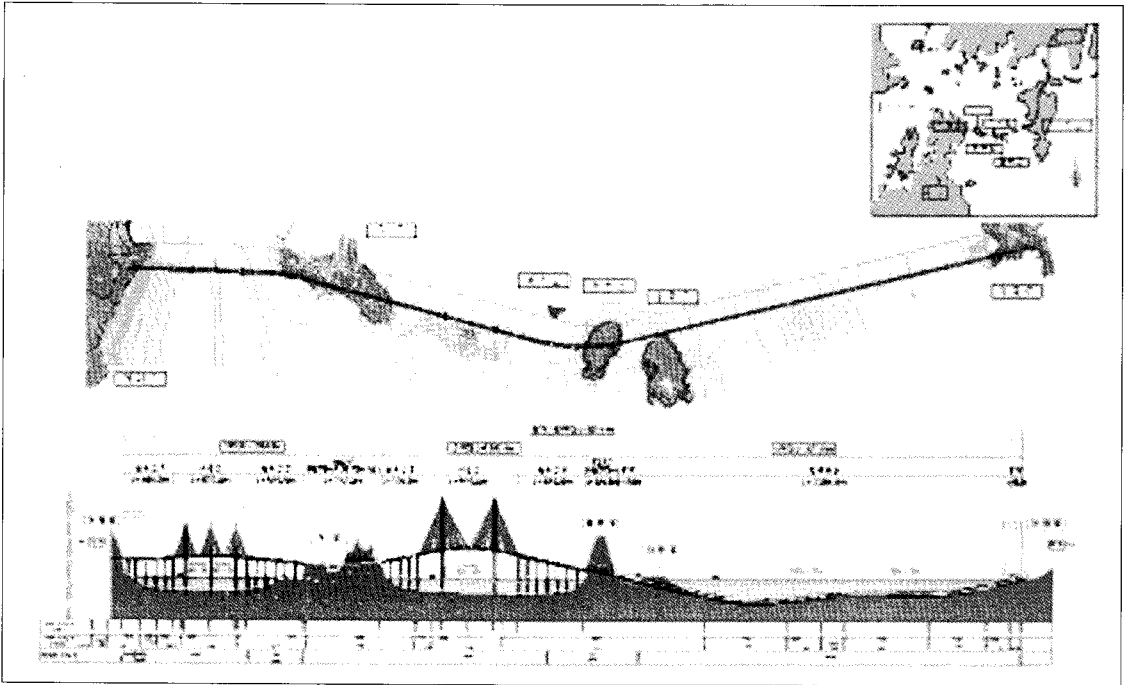
1. 개 요

부산-거제간 연결도로는 부산의 가덕도와 거제의 장목면을 해상으로 연결하는 프로젝트로서 그 경제적인 효용성 뿐만 아니라 대한민국의 토목기술을 한

단계 높일 것이라는 기대 때문에 대내적으로 지대한 관심을 받고 있다. 또한 침매터널의 경우 지금까지 유례가 없었던 수심과 해상조건으로 인해서 설계단계에서부터 해외기술자들로 부터도 지속적인 관심을 받고 있다.



<그림-1> 부산-거제간 연결도로 조감도



〈그림-2〉 부산-거제간 연결도로 종평면도

2. 사업현황

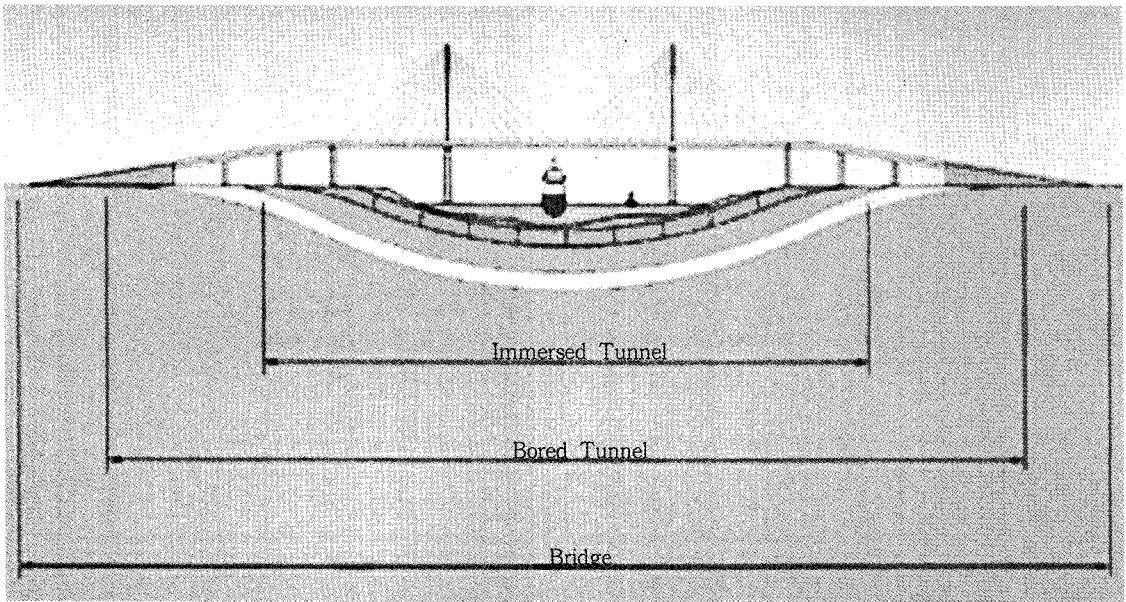
부산-거제간 연결도로 건설공사는 경상남도 거제시 장목면(거제도)에서 부산시 강서구 천성동(가덕도)을 해상으로 연결하는 총연장 8.2km의 사장교와 침매터널로 구성된 국가지원 지방도 58호선의 연장으로서, BTO(Build, Transfer & Operate)방식으로 추진하는 민간투자사업이다. 동쪽으로는 최근 개통된 대구-부산간 고속도로와 연결되고, 서쪽으로는 대전-통영간 고속도로와 연결되어 거제도를 기준으로 남해안을 U-Type으로 연결하는 교통로의 중앙에 위치하여 국내 제1의 항만도시 부산과 관광의 메카로 도약하는 거제를 연결하여 향후 교통 혈관으로써의 중추적 역할을 수행하게 될 전망이다. 부산광역시와 경상남도를 주무관청으로, 사업시행은 GK해상도로(주)가 맡고 있고 시공은 (주)대우건설 외 6개사로 구성된 GK시공사업단에서 수행하고 있다. 설계는 짧은 사업기간을 고려하여 시공과 동시에 진

행하는 Fast-Track 방식으로 진행되었다. 실시설계는 총12단계로 구성되어 있고 현재는 설계가 모두 완료되어 있는 상태이다. 설계기준은 국내 각종 기준과 함께 하중-저항계수설계법(LRFD)을 적용하였다.

특히 침매터널은 국내에서 최초로 적용되는 공법이며 또한 전세계적으로 유례없는 깊은 수심과 외해 조건 등으로 인하여 높은 기술수준을 요하는 고난이도 공사로 세계적인 주목을 받고 있다.

3. 침매터널

침매터널은 강이나 해협을 수저면 아래로 연결하는 터널의 하나로서 그 역사는 오래되었다. 최초의 침매터널은 철도용의 경우 1910년에 미국의 미시간과 온테리오를 연결하는 노선에 적용되었고 도로용은 1924년 미국의 포시에 건설되었다. 유럽과 일본은 1942년에 건설된 네덜란드의 Mass 터널과 1944



〈그림-3〉 구조물 형식별 연장 비교

년에 건설된 오사카 해저터널이 각각 최초의 침매터널이다. 한국의 경우는 현재 건설되고 있는 부산-거제간 연결도로 침매터널이 최초의 침매터널이다. 20세기 초에 최초의 침매터널이 건설된 이후에 교량이나 굴착터널에 비해서 경제적이고 시공성 측면에서도 장점이 있다는 침매터널의 특징으로 인해서 전세계의 여러 국가에서 지속적으로 침매터널이 건설되고 있다. 국내에서도 침매터널에 대한 수요가 본 사업을 시작으로 지속적으로 증가할 것으로 예상하고 있다.

침매터널의 특징은 경제성과 시공성 측면으로 크게 구분할 수 있다. 경제성 측면에서는 〈그림-3〉과 같이 교량 및 굴착터널과 각각 비교해 볼 수 있을 것이다. 대형선박의 진출입이 잦은 주항로를 가로지르는 위치에 설치되는 교량의 경우 통행하는 선박의 규모에 맞춰서 일정한 형하고를 확보해야 하므로 교량의 높이가 높아지고 노면구배를 고려하면 연장이 길어질 수 밖에 없다. 굴착터널은 굴착된 지반의 자체 지보능력이 확보될 수 있는 양호한 수준의 지반 조건에 시공이 가능하므로 굴착심도가 깊어지고 그

에 따라서 교량의 경우와 마찬가지로 연장이 길어진다. 반면 침매터널은 수저면하에 토피 두께 1~2m로 건설되므로 육상으로 접근하기 위해 필요한 어프로치부의 거리가 상대적으로 짧아서 육상점용면적이 줄어들게 된다. 이에 따라서 관련 공사비, 보상비, 유지관리비 등이 교량 및 굴착터널에 비해서 상대적으로 저렴하게 된다. 물론 이러한 비교는 일반적인 경우에 대한 것이고 프로젝트의 특성에 따라서 유불리에는 다소 차이가 있을 수 있다.

침매터널은 공법은 〈그림-4〉와 같은 주요공정으로 이루어지고 각각의 공정이 개별적으로 평행선상에서 동시에 진행된다. 바로 이러한 점이 침매터널 공법의 시공상의 특징이자 장점이다. 즉 공기를 단축시킬 수 있고 품질관리가 용이하다. 콘크리트 자체의 수밀성으로 방수기능을 수행하는 침매터널의 경우 콘크리트 품질관리가 어느 구조물보다도 중요하다. 그런 측면에서 공장에서 제품을 생산하듯이 제작장에서 단위합체를 제작하는 침매터널은 품질관리가 매우 용이하고 공기단축 또한 가능하다.

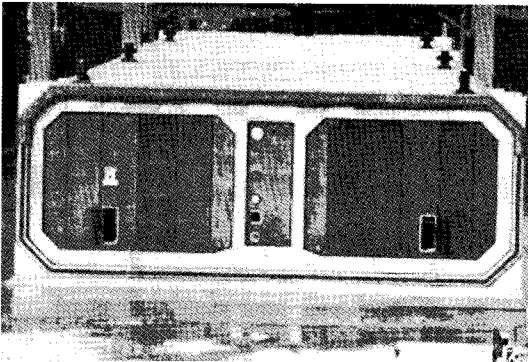
침매터널 공정을 좀 더 상세하게 살펴보면 합체제

- | |
|-----------------------------|
| 1. 합체 제작 (제작장) |
| 2. Trench 준설 (침설 위치) |
| 3. 지반개량 (침설 위치) |
| 4. 기초 Foundation 설치 (침설 위치) |
| 5. 침 설 (침설 위치) |
| 6. 합체 보호공 (침설 위치) |
| 7. 갯구부 구조물 (육상 Approach부) |

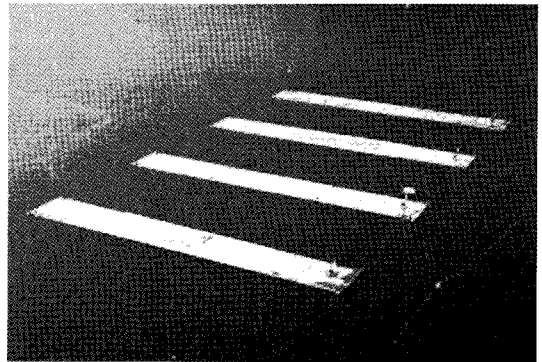
〈그림-4〉 침매터널 주요공정

작을 위한 콘크리트 타설작업은 특수 제작된 거푸집을 이용하여 콘크리트 양생초기에 발생할 수 있는

관통균열을 방지하기 위해서 일반적인 방식이 아닌 대단면을 한번에 타설하는 일괄타설방식으로 진행되며, 품질관리를 위해서 증기양생 등의 과정을 거쳐 침매합체가 완성된다. 이렇게 제작이 완료된 합체를 임시계류장으로 이동시키기 위해 수면 위로 띄우기 위한 준비작업을 하게 된다. 준비작업은 합체 양단에 Bulk head 라고 하는 격벽을 설치하는 작업과 드라이독 내부에 물을 채우는 주수작업으로 이루어진다. 주수로 인해서 합체가 급격히 거동하는 것을 방지하기 위해서 주수작업 실시 전에 합체 내부에 설치되어 있는 Ballast tank에 합체 내부배관을 통해 물을 채워 넣는 선행작업을 수행한다. 드라이독에 대한 주수가 완료되면 Ballast tank에 채워져 있는 물을 점진적으로 합체 밖으로 배수하므로써 합체를 띄우는 작업을 실시한다. 띄워진 합체는 드라



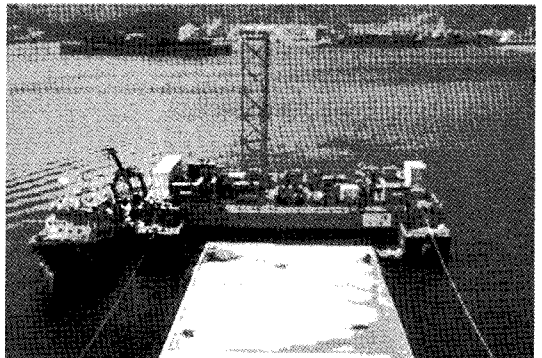
〈그림-5〉 격벽(Bulk head) 설치



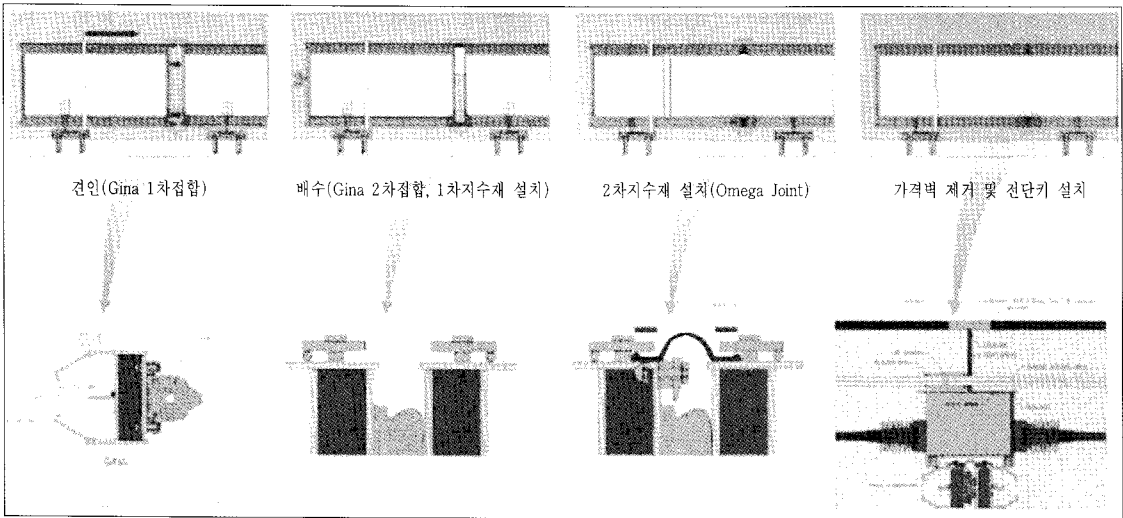
〈그림-7〉 임시계류장



〈그림-6〉 드라이독 주수 및 합체 반출



〈그림-8〉 침설을 위한 준비작업(계류장)



〈그림-9〉 침매터널 접합 및 조인트 부 공정

이독에 설치되어 있는 윈치(Winch)와 예인선에 의해서 제작장 밖으로 반출된 후에 계류장으로 즉시 예인되어 침설전까지 계류장에 미리 설치되어 있는 앵커 와이어에 고정되게 된다. 계류장에서는 침설을 위한 각종 장비와 가시설을 설치하는 작업이 이루어진다.

Trench 준설, 지반개량, 기초 Foundation 조성 등 함체 침설 전에 침설위치에서 이루어져야 할 선행공정이 완료되어 함체 침설이 가능해지면 국내최초로 적용되는 기상예보시스템을 통해서 해상기상 조건을 최종 확인한 후에 계류장에서 침설현장까지 함체를 예인하여 운반 한다. 침설위치에 함체가 도착하면 사전에 미리 설치해 둔 앵커 와이어를 함체에 연결하는 작업을 수행하여 파도와 조류에 대한 함체의 안정성을 확보한 후에 함체 내부에 설치된 Ballast tank 에 물을 채워 넣어 함체를 서서히 가라앉혀서 기설함체와의 접합면에서 50cm가 이격된 위치에서 기초에 안착 시킨다. 함체가 안착된 후에는 함체의 정확한 위치를 측정하기 위한 장치와 1차 접합을 위한 유압잭을 설치하는 작업을 수행한다. 이러한 작업이 완료되면 침매함체의 접합공정과 함체 배면 뒤채움 및 보호공 작업을 순차적으로 진

행하게 된다.

침매터널의 접합 및 조인트부에 대한 공정은 〈그림-9〉와 같이 유압잭의 견인에 의한 1차접합, 함체 사이의 공간에 있는 물의 배수에 의한 2차접합, 2차지수재의 설치, 가격벽 제거 및 전단키 설치의 순으로 이루어진다.

함체 운반 및 침설/접합 작업은 매 단위 함체마다 실시되고 이러한 작업과 함체 내부에서 실시되는 작업들이 완료되면 비로소 침매터널이 완성되는 것이다.

4. 콘크리트 내구성 설계

본 사업의 주변 환경조건은 해양환경으로 인한 염해를 주된 열화인자로 하고 있으므로, 구조물의 목표내구수명동안 구조적 안전성은 물론이고 염해에 대한 내구성이 충분히 확보되어야 한다. 콘크리트 구조물은 다른 재료에 비하여 내구성이 우수하다는 것이 일반적인 견해이나 최근에는 여러 콘크리트 구조물에서도 충분한 내구성이 확보되지 않은 경우가 많이 보고되고 있으며, 이에 따라 고품질의 내구성 확보를 위한 연구의 중요성이 나날이 증대되고 있는

〈표-1〉 내구성설계법의 비교

	기존의 내구성설계	최근의 내구성설계	
		Level 1	Level 2
		AASHTO, BS, EC	ACI-Life 365
원 리	경험 및 직관	비확률론적 계산	확률론적 계산
설계결과	최소피복, 최대 물시멘트비만 제시	열화메커니즘을 기초로 한 설계결과 - 내구수명, 손상확률, 최소피복, 최대염화물확산계수, 최소 탄산화저항 등을 제시	
환경 분류	불충분한 분류	상세하지 못한 분류	상세한 환경 분류 - 수중부, 비말대부, 대기부 등
열화모델	전달 및 열화모델 없음	전달 및 열화메커니즘에 대한 수학적 모델링	
콘크리트 품질	실제 콘크리트 특성과 무관	이론적인 특성에 기초 (콘크리트 배합에 근거한 이론적인 염화물 확산계수 도출)	실제 콘크리트 특성에 기초 (시험을 통한 실제 콘크리트의 염화물 확산계수 확인)

실정이다. 부산-거제간 연결도로의 콘크리트 구조물의 내구성 설계는 국내에서는 최초로 유럽을 중심으로 여러 분야의 전문가가 참여, 구조물의 성능을 기반으로 실제 구조물의 거동 및 실험데이터를 사용하여 개발된 최신 설계법인 DuraCrete에 의하여 수행되었다. DuraCrete에서는 염화물 침투와 콘크리트의 탄산화 등 각종 열화인자 등을 고려하여, 100년의 설계수명동안 90%의 확률로 초기부식발생을 방지할 수 있는 콘크리트의 최소피복두께(공칭 피복두께)와 내구성에 대한 가장 중요한 변수 중 하나인 최대 염화물확산계수를 제시한다.

가. DuraCrete 설계 개념

DuraCrete에 의한 내구성 설계의 기본적인 목표는 염화물 침투 및 탄산화 등의 열화메커니즘에 대하여 목표내구수명동안 구조물이 일상적인 유지관리 하에서 충분한 안전도를 확보하는 데 있으며, 기본적인 설계개념은 콘크리트 구조설계기준인 하중저항계수설계법(LRFD)과 일관성을 같이하고 있다. 이러한 개념 하에 특정사용기간 즉, 목표내구수명 동안에 구조물의 각종 열화인자에 저항하도록 재료 배합 및 구조 상세를 결정하고 이를 적용하는 절차

로 수행된다. 최근에 개발된 DuraCrete를 비롯한 최신의 내구성 설계법은 지금까지 대부분의 국가에서 사용하고 있는 규정과 다른 구조신뢰성이론에 기초한 확률적 사용연한설계 접근방법을 사용하고 있으며 이를 간단히 설명하면 다음 〈표-1〉과 같다.

염화물침투에 대한 열화모델에 사용된 식은 다음 식 (1)에서 나타난 바와 같이 일반적으로 확산방정식에 널리 사용되는 Fick's 2nd law이다.

$$C(x, t) = C_s - (C_s - C_0) \cdot \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right\} \dots (1)$$

위 식에서 $C(x, t)$ 는 표면 x 에서 떨어진 거리에서 시간 t 에 대한 염화물농도를 나타내고, C_s 는 표면염화물농도, C_0 는 초기염화물농도, D 는 염화물확산계수, erf 는 오차함수를 나타낸다. DuraCrete에서는 염화물확산계수가 시간의존적인 변수라는 실험결과를 바탕으로 다음 식 (2)와 같이 염화물침투의 수정된 열화모델을 제시하고 있다.

$$C(x, t) = C_s - (C_s - C_0) \cdot \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_s \cdot t}} \right) \right\},$$

$$D_s = \left(\frac{t_0}{t} \right)^n \cdot D_0 \dots \dots \dots (2)$$

식 (2)에서 D_s 와 D_0 는 각각 시간 t 와 $t=t_0$ 에서의 염화물확산계수 값이고 n 은 재령계수이다.

〈표-2〉 노출등급에 따른 구조물의 분류

노출등급 분류	교량구조물	터널구조물	환경조건
대기구간 (+3.5m 이상)	교각, 주탑, 교대, 상판 슬래브	내측벽체, 내측 상부 및 하부슬래브	유해이온 농도가 서서히 증가
비말대구간 (-9.5 ~ +3.5m)	교각, 주탑, 케이슨	-	반복되는 건습작용으로 인한 매우 높은 부식 환경
수중구간 (-9.5m 이하)	케이슨 하부	외측벽체, 외측 상부 및 하부슬래브	구조물의 모든 부분이 해수에 노출

또한, DuraCrete에서는 위와 같은 열화메커니즘에 의한 설계방정식뿐 아니라 하중과 저항의 설계변수 및 특성값, 각 하중 및 저항변수에 적용되는 각종 부분계수 그리고 확률론적 계산을 통한 신뢰성지수 등이 고려되고 있다. 이러한 확률론적 분석은 상업용 프로그램인 STRUREL의 한 부분인 COMREL이라는 구조신뢰성분석 프로그램을 이용하여 수행된다.

나. 부산-거제간 연결도로 구조물의 내구성 설계기준

부산-거제간 연결도로 구조물의 주변 환경조건은 해안환경으로 염해를 주된 열화인자로 하고 있으므로, 교량과 침매터널 모두 다음과 같은 노출등급으로 분류된다.

DuraCrete에서는 위의 표에서 나타난 노출등급에 따른 입력변수로 사용된 실제 데이터를 실제 구조물로부터의 측정치, 실험결과, DuraCrete에 의한 조사 및 일부 공학적인 판단을 근거로 다음과 같이 결정

하였다.

- 표면염화물량(Cl_s): 노출등급에 따라 결합재 중량의 2~4%
- 기초염화물량(Cl_b): 콘크리트 배합시 내부의 염화물량으로서 결합재 중량의 0.1%
- 염화물확산계수(D_{cl}): NT Build 492 기준에 의해 결정되는 염화물의 확산속도를 나타내는 값으로 $2.0 \sim 7.0 \times 10^{-12} m^2/sec$
- 임계염화물량(Cl_{cr}): 노출등급에 따라 결합재 중량의 0.6~1.8%
- 재령지수(a_r): 재령에 따른 염화물확산계수의 감소정도를 나타내는 지수(0.3~0.6)

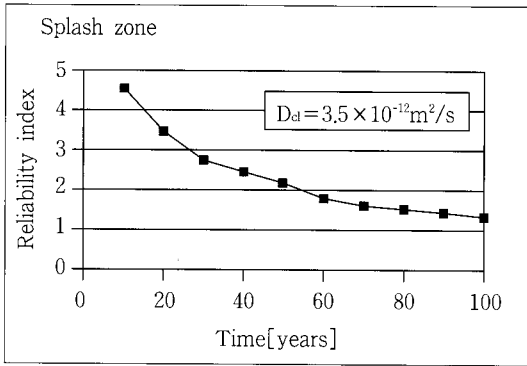
부산-거제간 연결도로 구조물에 요구되는 내구성 설계의 품질기준은 각각 다음과 같다.

- 목표내구수명: 100년
- 내구연한의 종료시점: 철근의 부식시작점(부식 진행기간은 포함되지 않음)
- 신뢰성 지수: $\beta = 1.3$ (신뢰도 90%)

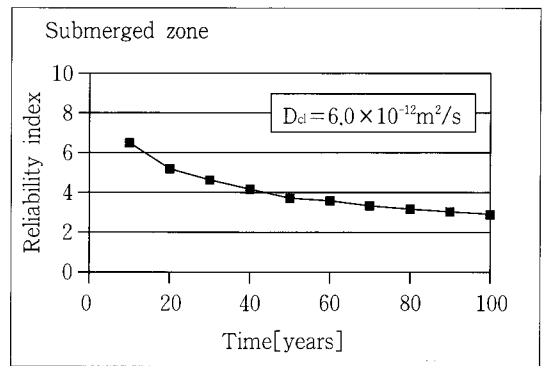
DuraCrete 접근방식에 의한 부산-거제간 연결도로 구조물의 내구성설계의 결과로 다음 표에서 제시

〈표-3〉 내구성설계에서 제시된 구조물별 조건

노출등급 분류	교 량		침매터널	
	최대염화물확산계수 ($10^{-12} m^2/sec$)	최소피복두께 (mm)	최대염화물확산계수 ($10^{-12} m^2/sec$)	최소피복두께 (mm)
대지구간	3.5	50	6.0	75
비말대구간	3.5	75	-	-
수중구간	6.5	75	6.0	75



<그림-10> 사용연한에 대한 신뢰성지수-교량대기구간



<그림-11> 사용연한에 대한 신뢰성지수-터널수중구간

된 최대 염화물확산계수와 최소 콘크리트 피복두께를 설계원칙으로 제시하였고 재령계수는 적용이 가능한 값 중에서 가장 낮은 값을 사용하였으므로 제시된 설계치는 안전측으로 제안된 것이다.

5. 결론

부산-거제간 연결도로 구조물의 내구성 설계기준으로 사용된 DuraCrete는 유럽을 중심으로 수행된 연구와 실적을 바탕으로 개발된 설계법으로 내구성에 관한 새로운 접근법을 제시하고 있다. 즉, 구조물의 내구성을 명확한 방법과 기준으로 설계하기 위하

여 기존의 하중에 의한 설계와 같은 방법으로 구조물의 내구성한계상태를 규정하고, 환경에 의한 열화요인을 고려하여 이에 따라 구조물이 가져야 하는 자체적인 내구저항 및 신뢰성이론을 도입한 확률론적인 내구성설계를 수행할 수 있도록 제시하고 있으며, 사용수명의 계산에서도 구조물의 한계상태와 환경조건을 합리적으로 고려할 수 있도록 하고 있다. 부산-거제간 연결도로 공사에는 현재 이러한 최신 내구성설계를 도입하여 국내의 내구성설계기술 및 염해에 우수한 콘크리트 제작기술의 발전을 도모하고 있다. ▲

시사 용어 해설

▶ 감정적 소구(Emotional Appeal)

소비자들의 마음을 움직이기 위한 광고메세지의 한 유형으로서 소비자들의 특별한 감정에 호소하는 방법이다. 합리적 소구가 계산과 논리를 통하여 가능한 객관적 근거를 제시함으로써 소비자들의 합리적 판단을 유도하는 것이라면 감정적 소구는 언어자극이나 시청각적 자극을 통해서 소비자들의 심리적이거나 사회적인 욕구를 자극함으로써 광고대상에 대하여 좋거나 싫은 감정을 느끼게 하려는 것이다. 예를 들면 자존심이나 경쟁심을 자극하여 이기적 행동을 하게 하거나 사랑, 우정, 아름다움을 통하여 이타적 행동을 유도하며, 공포심, 죄의식, 수치심 등의 감정을 자극하여 바람직하지 않은 행동을 피하게 하는 방법을 말한다.