

현장 콘크리트 타설시 양생온도와 대기시간을 고려한 배합설계 결정

문성우¹ · 이성행¹ · 최현욱*
¹부산대학교 사회환경시스템공학과

Design of a Concrete Mix Considering Curing Temperature and Delay Time in Concrete Placement

Moon, Sungwoo¹, Lee, Seong-Haeng¹, Choi, Hyun-Uk*

¹Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

Abstract : The concrete mix should be designed and produced to reflect the specific site conditions during concrete placement. That is, the concrete mix design should be planned considering temperatures, work environments, pouring methods, etc. The objective of this research is to understand the external factors of curing temperature and delay time that influence concrete strengths during pouring work, and provide concrete mix design that can be most robust to the effects of external factors. The Taguchi's robust method is used in preparing the concrete mix design to achieve the research objective. In a case study, an indoor concrete test was performed to find the optimal combination of concrete mixes with external factors of curing temperature and delay time. Concrete test cylinders were made to test concrete strengths given different external factors. The study results showed that the optimal performance of concrete strength can be achieved by applying the robust method when preparing a concrete mix design.

Keywords : Concrete Mix Design, Concrete Strength, Robust Design Method, Internal Design Factor, External Influence Factor

1. 서론

1.1 연구의 배경

콘크리트는 구조물을 구성하고 설계된 기능을 제공하기 위해서 중요한 재료로 활용되고 있다. 콘크리트 재료는 시설물 건설에서 기초, 바닥, 벽체, 기둥 등 다양한 형태로 적용된다. 콘크리트 재료는 거푸집 형상으로 타설되어서 시설물 공간을 제공하고, 자연환경으로부터 제공된 공간을 보호한다. 철근 그리고 강재와 함께 시공되는 콘크리트는 시설물에 가해지는 압축력 또는 힘 등에 적절하게 대응하여 시설물 운영기간 동안 구조물로서의 안정성을 유지해야 한다.

콘크리트 타설은 시공 구조물의 성능을 확보하기 위해서 핵심적인 시공절차이다. 따라서 콘크리트 타설작업은 건설공사 시공시 중점관리 대상이며, 품질관리가 철저히 이행되어야 한다. 콘크리트 타설작업은 자연환경에서 수행되

로 특정한 자연환경에 영향을 많이 받게 된다. 장기간 시공되는 건설공사의 특성상 자연환경은 주기적으로 변화하고, 때로는 급격하게 변화하게 되며, 이러한 자연환경의 변화는 콘크리트 성능에 영향을 가져오게 된다. 따라서 시설물에서 요구하는 콘크리트의 성능을 보장하기 위해서는 콘크리트 품질관리에 지속적인 관찰과 시험이 필요하다.

콘크리트 품질은 슬럼프, 강도, 염소이온량, 공기량 등으로 측정된다. 슬럼프는 현장타설시 콘크리트의 유동성과 관련 있으며, 유동성에 따라서 작업효율이 변화하므로 시공성과 밀접한 관련이 있다. 콘크리트 강도는 시설물에 가해지는 응력에 저항하기 위한 설계 요구치이며, 현장타설 후 설계강도 이상을 유지해야 한다. 염화칼슘은 콘크리트 부식과 관련이 있으며, 염화칼슘을 조절하여 콘크리트 수명을 높일 수 있다. 공기량은 콘크리트 강도뿐만 아니라 콘크리트 타설시 필요로 하는 유동성 등에 영향을 가져온다. 콘크리트 첨가제는 콘크리트 품질을 저해하지 않는 범위 내에서 콘크리트 재료의 품질요인을 확보하는 역할을 한다.

콘크리트 재료로써 슬럼프, 강도, 염화칼슘, 공기량에 대한 품질관리 요인은 콘크리트 배합설계를 통해서 실현된다. 배합설계에서는 시방서에서 요구하는 품질을 보장하기 위

* Corresponding author: Choi, Hyun-Uk., Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Korea.
E-mail: csc919@naver.com
Received August 14, 2018; revised -
accepted September 3, 2018

해서 시멘트, 굵은골재 비율, 물·시멘트 비를 조절하고, 적절한 배합을 통해서 시설물 시공에 필요한 요구사항을 충족하게 된다. 배합설계는 콘크리트 사양서에 따라서 수행하게 되며, 반복적인 시험을 통하여 설계조건을 맞추게 된다.

일반적으로 콘크리트 배합설계 시에는 슬럼프, 강도, 염화칼슘, 공기량 등 콘크리트 품질과 관련한 설계요인이 중요한 고려대상이 된다. 그러나 실제 콘크리트 타설시에는 자연환경이 지속적으로 변화하므로 콘크리트의 성능을 보장하기 위해서는 콘크리트 타설환경에 최적화된 내구성 높은 콘크리트 배합설계가 필요하다. 따라서 배치 플랜트에서는 콘크리트 타설현장의 현장조건을 충분히 반영한 콘크리트 배합설계를 설정해야 하며, 이러한 배합설계를 바탕으로 콘크리트를 생산하여 현장에 배송해야 한다. 즉, 콘크리트 배합설계는 특정 현장타설 시 기온, 현장여건, 작업조건 등 외부영향요인을 충분히 고려하여 적절한 품질을 가지도록 준비되어야 한다는 것이다.

1.2 연구목적 및 방법

연구배경에서 설명한 바와 같이 콘크리트의 성능을 보장하기 위해서는 자연환경 변화에 최적화되는 콘크리트 배합설계가 필요하다. 본 연구의 목적은 콘크리트 생산시 콘크리트 품질에 가져오는 외부영향요인을 분석하고, 이러한 외부영향요인에 최적으로 대응할 수 있는 설계배합 방안을 제시하는 것이다. 연구과정에서는 설계배합과 관련하여 내부영향요인과 외부영향요인을 고려했다. 내부영향요인으로는 슬럼프, 강도, 염화칼슘, 공기량 등 콘크리트 설계요인을 적용했다. 외부영향요인으로는 기온, 대기시간, 진동, 작업속도, 거푸집 등 여러 가지 요인이 있으나, 본 연구에서는 기온과 대기시간 두 가지를 고려했다(Fig. 1).

본 연구에서 제시하는 로버스트(Robust)한 콘크리트 배합설계는 콘크리트 배합설계시 내부영향요인과 외부영향요인을 동시에 고려하며, 기존 배합설계와는 차별화된 접근방법을 제공한다. 기존 콘크리트 설계배합 시에는 단순히 사양서 한계치를 만족하는 것이 일반적인 방법이었으나, 본 연구에서는 현장에서 타설되는 콘크리트가 최상의 성능을 가질 수 있는 콘크리트 배합비율을 가지는 것을 목표로 했다. 본 연구의 사례분석에서는 내부영향요인에 대한 콘크리트 배합을 실시하고, 외부영향요인을 변경하여 콘크리트 품질조사를 수행했다. 이후 내부영향요인과 외부영향요인의 조합에 대한 품질조사 결과를 분석하여 현장조건 변화에 대응하여 가장 내구성이 높은 콘크리트 배합설계를 찾아서 현장조건을 고려한 콘크리트 품질을 향상시킬 수 있다는 것을 증명했다.

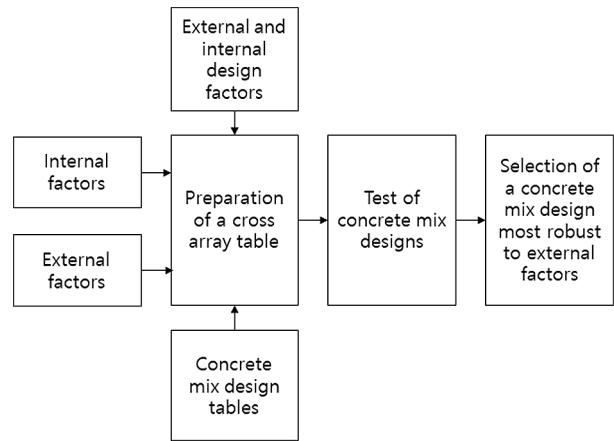


Fig. 1. Research procedure

2. 이론적 고찰 및 관련연구

2.1 이론적 고찰

다구찌 설계방법은 내부영향요인과 외부영향요인을 고려하여 로버스트한 제품을 생산하고자 하는 시도이다(Taguchi, 1986). 다구찌는 제품생산 시 기존 품질관리가 허용오차 범위 내의 제품을 생산하는 것에 초점을 맞추고 있다는 점에 대한 문제를 제기했다. 기존 품질관리는 제품이 하자가 있어도 오차범위 안에 들어가면 합격으로 처리하게 된다.

다구찌 설계방법에서는 외부영향인자를 고려하여 가장 대응력이 높은 설계인자를 선택하여 제품의 내구성과 대응력을 높여야 한다. 즉, 생산된 제품은 운영되는 환경이 변하더라도 목표로 하는 제품성능을 제공해야 하며, 설계인자를 선택할 때 외부영향요인에 관계없이 지속적인 제품성능을 보장해야 한다는 것이다.

다구찌 설계방법은 품질의 균일성과 신뢰성을 확보할 수 있는 품질관리의 새로운 기법으로 적용되고 있으며, 제품생산 시 품질개선에 크게 기여하고 있다. 이후 품질관리 방법에 커다란 영향을 가지고 왔으며, 린(Lean) 생산기법으로 발전하고 있다.

2.2 관련연구

콘크리트 배합설계는 콘크리트의 성능을 결정하게 되므로 배합설계에 관한 다양한 연구가 진행되고 있다(Jung et al., 2016; Kim et al., 2017). 콘크리트 배합설계에 대한 일반적인 연구는 콘크리트 배합을 구성하는 재료의 상호작용에 대한 결과와 이해를 통하여 물·시멘트 비, 잔골재율, 단위수량, 단위 시멘트량, 단위 잔골재량, 단위 굵은 골재량 등을 산정하는 것이다. 콘크리트 배합설계에 관한 연구 중 본 연구와 관련해서 주목해야 할 점은 배합설계시 현장조건

을 충분히 고려하여 콘크리트 성능을 보장하고자 하는 시도이다. 이러한 시도는 배합설계에 대한 일반적인 설계배합뿐만 아니라 계획된 설계배합이 현장조건에서 어떻게 반응할 것인가를 고려하여 최적화하고자 하는 것이다.

Kim et al. (2010)은 베이지안 통계법을 이용하여 성능기반형 배합설계방법을 활용하여 고강도 콘크리트 배합설계를 수행했으며, 이러한 노력을 통하여 특정 현장조건 하에서 콘크리트 성능을 확보했다. 본 연구의 특징은 배합설계 과정은 1) 발주자 요구사항을 중심으로 초기설계를 실시하고, 2) 개발된 초기설계를 평가하여 최적화하며, 3) 중간설계를 다시 실시하여 최종설계를 완성하는 절차를 포함한다. 이와 같은 성능기반형 배합설계방법은 특정지역의 환경조건, 사용 가능한 재료, 콘크리트 생산기술 등을 고려하여 최적의 콘크리트 배합을 결정할 수 있다는 것이다.

Lee et al. (2001)은 대형 주거복합 빌딩의 기초매트에 발생될 수 있는 온도균열을 방지하기 위한 설계배합 방안을 제시했다는 점에서 특징이 있다. 연구자들은 플라이애쉬를 사용하여 현장조건에 따른 소요품질 수준을 만족할 수 있도록 단위 시멘트량과 단위수량을 최소화 시켰다. 본 연구의 특징은 매스 콘크리트라는 특정 대상 구조물에 대한 타설전 최적 배합설계를 했다는 것이며, 노출, 살수, 염화비닐, 양생포 등 다양한 양생조건에서 온도균열 발생여부를 검토했다.

배합설계시 발생하는 다양한 현장조건을 고려할 때 반복되는 배합설계는 시간과 노력을 필요로 한다. 반복되는 시간과 노력을 줄이기 위해서 유전자 알고리즘(Lee et al., 2010), 또는 신경망 기법을 적용한 연구가 다수 수행됐다(On et al., 2013; Oh et al., 1997). 유전자 알고리즘 또는 신경망 기법은 배합설계시 설계인자를 변경시키면서 수행하는 과정에서 소요되는 시간과 비용을 줄이기 위한 노력으로 시도되고 있다.

특히 Oh et al.은 신경망을 이용하여 콘크리트 배합설계시 설계인자의 상호작용을 고려하는 방안을 제시했으며, 이를 통하여 배합설계가 가져오는 콘크리트 특성을 예측하고자 시도했다. 연구자들은 콘크리트 배합설계는 재료, 온도, 현장조건, 기술자 숙련도 등 불확실성이 존재한다고 지적하고, 이를 극복하기 신경망의 이용방안을 연구했다. 연구 과정에서는 신경망의 학습기능을 이용하여 콘크리트 강도, 굽은골재 최대치수, 슬럼프가 변화시 자동으로 물·시멘트비, 잔골재율, 단위수량, 단위 시멘트량, 단위 잔골재량, 단위 굽은 골재량을 산정했다.

이와 같이 다수의 연구자들이 콘크리트 배합설계의 성능을 향상시키기 위해서 연구를 했으나, 콘크리트 성능을 확보하기 위해서는 콘크리트 타설현장에서 발생하는 현장조건을 고려하여 콘크리트 배합설계를 준비해야 한다. 현장조

건을 고려한 콘크리트 배합설계는 현장에서 발생하는 외부 영향요인을 고려하여 품질 높은 콘크리트 생산과 타설을 가능하게 할 것이다.

3. 배합설계요인

Ministry of Land, Infrastructure and Transportation (2009)은 콘크리트 배합을 콘크리트를 만들 때 소요되는 각 재료의 비율 또는 사용량이라고 정의하고 있으며, 배합설계는 콘크리트표준시방서에 따라서 시설물 시공에 필요한 배합을 결정하는 절차이다. 한천구(1998)는 콘크리트 배합설계에 대하여 콘크리트가 가지는 양질의 콘크리트, 즉 강도, 워커빌리티, 균일성, 수밀성, 내구성 등 요구성능을 충족시키기 위해서 각 구성 재료의 혼합비율을 가장 경제적으로 결정하는 작업이라고 정의하고 있다.

시방배합표는 콘크리트의 요구성능을 가장 경제적으로 구현하기 위해서 각 구성 재료의 혼합비율을 규정하는 표준수치이다. 콘크리트 생산에 우선하여 이러한 표준배합설계는 표준적인 수치를 정의하고 있으며, 현장에서 요구하는 성능에 부합하기 위해서 콘크리트 생산시 콘크리트 구성요소를 변화시켜서 최적의 콘크리트 성능을 보장해야 한다. 표준배합설계를 정의하여 현장에서 요구하는 콘크리트 배치를 생산하여 효과적으로 공급할 수 있다.

콘크리트 배합설계에 필요한 배합설계요소에는 물, 시멘트, 잔골재, 굽은골재, 그리고 혼화재료가 있다. 실제 콘크리트 생산전에 배합설계요소에 대한 개별 재료실험을 실시하여 각 재료의 특성에 대한 정보를 가지고 있어야 한다. 즉, 시멘트는 비중을 골재는 비중, 입도, 조립률, 표면수량, 흡수량 및 단위용적중량 등을 분석해야 한다. 표준배합설계에서 가장 중요한 점은 물·시멘트비, 골재입도, 시멘트, 굽은골재 최대치수, 혼화재 특성 등이 있다. 이러한 배합설계요소는 콘크리트의 강도에 영향을 가져오게 된다. <Table 1>은 배합설계요소와 이에 대한 특성을 설명하고 있다.

배합설계는 1) 계산에 의한 방법; 2) 배합표에 의한 방법 그리고 3) 시험배합에 의한 방법 등이 있으며, 이중 시험배합에 의한 방법이 가장 많이 적용되고 있다. 국내 Concrete Standard Specification에 따르면 배합설계는 1) 강도 및 내구성을 고려한 물·시멘트 비의 결정 2) 최대 골재크기의 결정 3) 물·시멘트비, 최대 골재크기를 고려한 슬럼프 4) 공기량, 잔골재율, 단위수량의 결정 5) 배합조건에 따른 잔골재율 및 단위수량 조정 6) 시멘트 및 혼화제량 결정 7) 굽은골재 및 잔골재량 결정 그리고 8) 내 실험결과분석 및 현장배합설계의 순서로 진행된다(Ministry of Land, Infrastructure & Transportation, 2009).

콘크리트 배합설계는 Concrete Standard Specification 등에 상세히 절차가 수립되어 있으나 배합설계요소들이 가지는 다양한 특성을 배합설계에 반영해야 한다. 이러한 특성을 반영하지 않을 경우 지역, 장소 등 콘크리트 외부요인에 따라서 콘크리트 성능에 커다란 차이가 발생할 수 있다. 어디서, 어떻게 콘크리트 배합했느냐에 따라 결과상에 차이가 나타나게 된다. 콘크리트의 성능을 결정하는 여러 가지 요인을 고려해야 함에도 불구하고 실제 배합설계 시에는 워커빌리티와 압축강도에 초점이 주어지고 있는 현실이다. 이와 같은 경우 기본적인 콘크리트 요구사항은 만족한다고 하여도 동결융해 저항성, 화학적 침식 등 현장여건에 따라서 발생하는 문제를 극복하기 어렵다.

4. 콘크리트 품질 외부영향요인

일반적으로 시설물 시공시 콘크리트는 자연환경에 노출된 조건에서 타설하게 된다. 콘크리트는 타설후 화학변화를 거쳐서 설계기준 상의 강도가 나타나게 되므로 이러한 콘크리트 타설중과 타설후 현장조건은 콘크리트 품질에 많은 영향을 가져온다. 자연환경은 수시로 변화하며 컨트롤할 수 없기 때문에 콘크리트는 자연환경 변화에 대응할 수 있어야 한다. 또한 시공여건에 따라서 작업자 숙련도, 타설방법 등이 다르게 되므로 이러한 관리적 요소가 콘크리트 품질에 영향을 가져온다.

건설공사 시공시 콘크리트 품질에 영향을 가져오는 외부 영향요인에는 타설온도, 양생온도, 기온변화, 강우, 대기시간, 타설시간 등이 있다. 예를 들어서 타설온도의 경우 타설시점이 아침인가 또는 낮인가에 따라서 일별 온도차가 발생할 수 있다. 양생온도는 건설공사 기간이 길기 때문에 콘크리트 작업시점에 따라서 콘크리트 양생시 년간 온도차가 크게 다를 수 있다. 또한 타설기간 중 발생하는 강우는 콘크리트 물·시멘트비를 변화시켜서 강도저하를 가져온다.

배치플랜트에서 콘크리트 생산 후 타설전까지 지연되거나 또는 타설과정에서 소요되는 시간은 콘크리트의 화학변화를 일으키게 되므로 콘크리트 품질을 저하시킨다. 작업자의 숙련도에 따라서 콘크리트 재료분리 등 문제점을 일으킬 수 있다. 작업난이도는 구조물의 특성에 따라서 발생된다. 타설시 콘크리트에 가해지는 진동은 콘크리트의 균일한 품질을 확보하기 위해서 필요하다.

본 연구에서는 제한된 시간과 비용으로 인하여 여러 가지 외부영향요소 중 양생온도와 대기시간을 중심으로 연구를 진행했다. 여러 가지 외부영향요소 중 두 가지 외부영향요소만을 가지고 실험했으나 필요에 따라서 이를 확장하여 의도하는 성과를 올릴 수 있을 것으로 판단된다.

5. 사례적용

5.1 배합실험계획표 작성

샘플사례는 사례분석을 실시하기 위해서 설정했으며, 콘크리트 품질에 영향을 가져오는 외부영향요인을 정하고 외부영향요인에 가장 내구성이 높은 설계배합을 결정했다. 내부영향요인은 '3. 콘크리트 배합설계 요인' 중 잔골재율과 혼화제 두 가지를 적용했다. 외부영향요인은 '4. 콘크리트 품질 외부영향요인' 중 양생온도와 대기시간 두 가지를 적용했다. 샘플사례에서는 내부영향요인과 외부영향요인의 조합에 대하여 콘크리트 배합설계를 준비하고, 공시체를 만들어서 3일 양생후 강도 테스트를 실시하여 콘크리트 품질을 분석했다. 콘크리트 품질은 강도, 슬럼프, W/C 비, workability, 공기량에 대한 데이터를 수집하고, 수집된 데이터를 통하여 외부영향요인에 가장 내구성이 우수한 콘크리트 배합설계를 설정했다.

콘크리트 배합실험에는 콘크리트 구조물에서 가장 일반적으로 많이 사용되고 있는 콘크리트 강도 24MPa를 적용했다. Appendix I은 '5.4 내부영향요인과 외부영향요인 배열표'의 내부영향요인과 외부영향요인을 실험하기 수행된 사용한 콘크리트 배합실험계획표이다. 배합실험계획표는 4가지 경우의 배치믹스를 포함하고 있으며, 각 배치믹스에 대하여 잔골재율과 혼화제를 변화시켜서 조합을 만들었으며, 4가지 경우의 외부영향요인을 설정하여 실험했다.

Appendix I의 배합실험계획표에서 볼 수 있는 바와 같이 배치믹스는 모두 물 175kg/m³과 시멘트 물 330kg/m³의 배합을 가진다. 각 배치믹스는 잔골재율과 혼화제를 변화시켜서 조합했다. 예를 들어서 배치믹스 1은 잔골재량 835kg/m³, 굵은 골재량 930kg/m³, 그리고 혼화제 1.2kg/m³으로 구성됐다. 반면 배치믹스 2는 잔골재량 835kg/m³, 굵은 골재량 930kg/m³으로 배치믹스 1과 동일하지만, 혼화제 1.6 kg/m³으로 구성됐다.

각각에 대한 배치믹스는 지연시간과 양생온도를 변화시켜서 콘크리트 공시체를 제작했다. 지연시간과 양생온도를 변화시킨 이유는 콘크리트 타설환경을 나타내는 외부요인을 나타내기 위해서이다. 예를 들어서 배치믹스 1의 콘크리트 공시체는 지연시간 0분이 경과한 후에 6개의 콘크리트 공시체를 제작했다. 이렇게 제작된 공시체 중 3개는 양생온도 15℃에서 양생하고, 다른 공시체 3개는 25℃에서 양생했다.

또한 지연시간 30분이 경과한 후에 6개의 콘크리트 공시체를 제작했다. 이렇게 제작된 공시체 중 3개는 양생온도 15℃에서 양생하고, 다른 공시체 3개는 25℃에서 양생했다. 따라서 각 배치믹스에서 12개의 공시체가 제작됐으며, 4개의 배치믹스가 있으므로 전체 48개의 공시체가 제작됐다.

5.2 콘크리트 공시체 제작

배합실험은 실험의 균질성을 확보하기 위해서 하루에 걸쳐서 실시됐다. 실험과정에서는 실험계획에 따라서 지연 시간을 3가지 수준으로 적용하여 공시체를 제작했다. 제작된 실린더는 양생온도를 2가지 수준으로 적용했다. 각 경우의 조합에 대하여 3편의 공시체를 만들었다. 배합비 변화는 <Table 1>에서 볼 수 있는 바와 같이 잔골재율과 혼화제에 대하여만 실시했다.

Appendix I에서 볼 수 있는 바와 같이 4개의 배치믹스가 준비됐으며, 각 배치믹스는 4가지 조합이 발생하므로 총 공시체 수는 72개를 제작했다. 실험횟수를 고려하여 콘크리트 요소별 수준을 2단계로 설정했으며, 양생온도도 2단계로 설정했다.

콘크리트 공시체 제작 전 슬럼프, 공기량 등을 측정했다. 즉, 콘크리트 공시체는 지연시간 0, 30분 그리고 60분 3가지 경우가 있으므로, 각 공시체 제작 전 슬럼프, 공기량 등을 측정하여 품질 테스트를 실시했다. 제작된 공시체는 15℃와 25℃에서 3일간 양생 후 압축강도 실험을 실시했다(Fig. 2).



Fig. 2. Picture images of concrete mix design

5.3 배합설계 실험결과

배합실험 결과를 바탕으로 콘크리트의 슬럼프, 공기량 그리고 압축강도를 분석했다. <Fig. 3>은 배합실험결과를 보여준다. 각 수준별 슬럼프를 살펴보면 4가지 배치믹스 모두 지연시간이 증가함에 따라서 슬럼프가 저하되는 것을 알 수 있다(Fig. 3 (a)). 이 경우 배치믹스 2가 가장 양호하게 슬럼프를 유지하고 있으며, 배치믹스 4가 차순위로 나타난다. 배치믹스 1과 3은 양생온도 60분에서 급격하게 슬럼프가 저하됨을 보여준다.

각 수준별 공기량을 살펴보면 4가지 배치믹스 모두 지연

시간이 증가함에 따라서 공기량 또한 저하되는 것을 알 수 있다(Fig. 3 (b)). 이 경우 배치믹스 3이 가장 높은 공기량을 가지는 것을 알 수 있으며, 배치믹스 1이 차순위로 나타난다. 배치믹스 2와 4는 공기량의 변화가 배치믹스 1과 3에 비하여 상대적으로 작음을 보여준다.

압축강도의 경우 양생온도가 25℃에서 15℃에서 보다 압축강도가 높아짐을 알 수 있다. 15℃에서는 배치믹스 2와 4가 지연시간 0분, 30분 그리고 60분에서 가장 높은 분포를 보여줬다. 25℃에서도 지연시간 0분, 30분 그리고 60분에서 배치믹스 2와 4가 가장 높은 분포를 보여줬으나, 지연시간 0분에서 특히 배치믹스 2가 가장 높은 분포를 가지는 것을 알 수 있다.

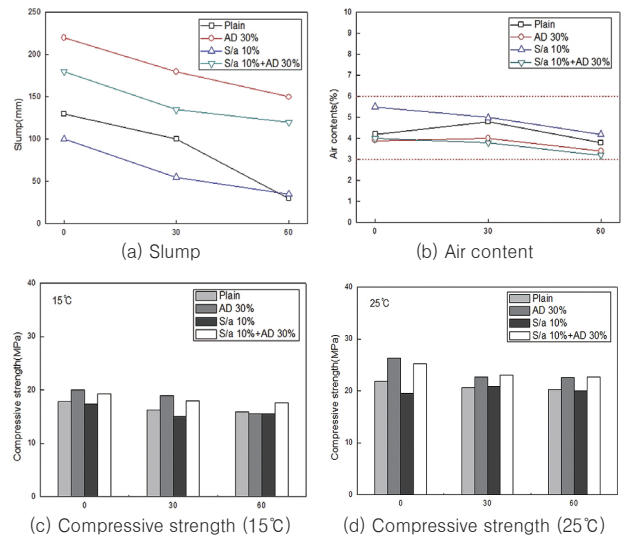


Fig. 3. Test result of concrete mix design

5.4 내부영향요인과 외부영향요인 배열표

배합설계 실험결과가 보여주는 바와 같이 배치믹스 2와 4가 슬럼프, 공기량, 압축강도 등에서 가장 우수한 콘크리트 품질을 가지는 것을 알 수 있다. 이 경우 지연시간과 양생온도 등 외부영향요인의 영향이 콘크리트 품질에 어떻게 영향을 가져오는지 정량적으로 알기 힘들다. 본 절에서는 배합설계 실험결과 중 압축강도를 적용하여 콘크리트 배치가 지연시간과 양생온도 등 외부영향요인에 대하여 가장 내구성이 우수한 배치믹스를 찾는다.

다구찌 배열표는 외부영향요인에 가장 내구성이 높은 설계배합을 찾는 방법이다(Taguchi, 1986). 본 연구에서도 다구찌의 배열표를 작성하여 가장 내구성이 높은 콘크리트 설계배합을 찾으려 구성했다. 즉, 외부영향요인에 대하여 가장 내구성이 우수한 배치믹스를 찾기 위해서 배합설계 실험결과 얻은 압축강도를 적용하여 다구찌의 배열표를 작성했다(Table 1).

Table 1. Cross array table of design parameters and external influence factors

Delay time (min) Curing temperature (°C)			Outer layer (External influence factor)							
			0	0	30	30	60	60		
Batch Mix			Inner layer (Design parameter)		Response (Concrete compressive strength)					
			S/A ratio (%)	Admixture (kg/m ³)	15	25	15	25	15	25
1	47.0	1.2	17.89	21.83	16.33	20.68	15.86	20.33		
2	47.0	1.6	19.98	26.40	18.90	22.73	16.52	22.53		
3	51.7	1.2	17.41	19.49	15.12	20.88	15.53	20.02		
4	51.7	1.6	19.30	25.24	17.92	23.07	17.61	22.67		
Remarks	1) Levels for design parameters: S/A ratio Level (1)→47.0%; Level (2)→51.7% Admixture Level (1)→1.2 kg/m ³ ; Level (2)→1.6 kg/m ³ 2) Levels for external factors: Delay time Level (1)→0min; Level (2)→30min; Level (3)→60min Curing temperature Level (1)→15°C; Level (2)→25°C									

5.5 로버스트 배합설계 결정

〈Table 1〉의 배열표를 바탕으로 콘크리트 압축강도에 가져오는 외부영향요인의 영향을 정량적으로 분석하기 위해서 다구찌 방법에서 적용하는 노이즈 분석을 실시했다. 노이즈 분석은 단순히 시방서 한계값을 고려하는 것이 아니라 최상의 콘크리트 품질을 가지기 위한 설계배합인자 결정하는 시도이다. 다구찌 방법에서 노이즈는 SN비(Signal to Noise Ratio)를 사용하여 나타낸다.

SN비라는 것은 신호입력과 잡음이 주는 영향을 비율로 표시하는 것이다. 즉 SN비는 신호입력이 성능에 기여한 량과 잡음이 성능에 나쁘게 기여한 량의 비라는 의미를 가진다. SN비는 내부영향요인과 외부영향요인의 배열표에서 구한 품질값을 사용하여 구할 수 있다. 본 논문에서는 〈Table 1〉의 배열표에서 콘크리트 강도를 사용하여 구했다.

일반적으로 성능목표치가 최대값을 가질 경우 SN비는 식 (1)을 사용하여 구할 수 있다. 콘크리트 강도는 주어진 시방서 값 이상의 최대값을 가지는 망대특성을 가지고 있으므로 식 (1)과 같이 log 함수를 사용하여 구한다.

$$SN비 = 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (1)$$

〈Table 2〉는 Appendix I의 4가지 배치믹스 조합에 대하여

구한 콘크리트 강도의 평균치와 SN비의 계산결과를 보여준다. 〈Table 2〉에서 평균치와 SN비는 오른쪽 2개의 열에 정리되어 있다. 4가지 배치믹스 각 경우의 평균치를 살펴보면 배치믹스 2가 가장 높은 압축강도, 즉 21.19 MPa를 가지며, 이러한 압축강도는 주어진 목표 압축강도를 초과한다. 또한 배치믹스 2가 가장 높은 SN비 값을 가진다. 따라서 콘크리트 압축강도는 망대특성을 가지므로 〈Table 1〉의 배열표의 배치믹스 조합 중에서 배치믹스 2를 선택해야 한다.

이러한 SN비 분석결과는 '5.3 배합설계 실험결과'에서 분석된 결과와도 일치한다. 결과적으로 사례분석에서 적용된 외부영향요인이 주어졌을 경우 잔골재 비율은 47.0%, 혼화재는 1.6kg/m³을 사용해야 최적의 콘크리트 품질을 보장할 수 있다는 것을 알 수 있다.

6. 결론

콘크리트 배합설계는 일반적으로 콘크리트 표준시방서를 준수하여 작성된다. 배합설계 과정에서는 콘크리트 시험을 통하여 적정 콘크리트 품질이 확보됐는지를 분석하게 된다. 그러나 이 과정에서 현장조건에 대한 고려가 되지 않고 있다는 문제점이 있다. 장기간에 걸쳐서 다양한 자연조건에 연중 변화뿐만 아니라 일중 변화가 발생하는 건설현장을 고

Table 2. Calculation of \bar{y} and SN

Delay time (min) Curing temperature (°C)			Outer layer (External influence factor)						\bar{y}	SN
			0	0	30	30	60	60		
Batch Mix			Inner layer (Design parameter)		Response (Concrete compression strength)					
			S/A ratio (%)	Admixture (kg/m ³)	15	25	15	25	15	25
1	47.0	1.2	17.89	21.83	16.33	20.68	15.86	20.33	18.82	25.30
2	47.0	1.6	19.98	26.40	18.90	22.73	16.52	22.53	21.18	26.23
3	51.7	1.2	17.41	19.49	15.12	20.88	15.53	20.02	18.08	24.94
4	51.7	1.6	19.30	25.24	17.92	23.07	17.61	22.67	20.97	26.19

려할 때 콘크리트 배합설계시 자연조건 등 외부영향요인을 함께 고려하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 자연환경에 노출되는 콘크리트의 성능을 보장하기 위해서 콘크리트 생산시 콘크리트 품질에 가져오는 외부영향요인을 분석하고, 이러한 외부영향요인에 최적으로 대응할 수 있는 설계배합 방안을 제시했다. 최적 설계 배합을 결정하기 위해서 외부영향요인과 내부영향요인으로 구성되는 배열표를 작성했다. 배열표 상에 도출된 외부영향요인과 내부영향요인의 조합을 실험하기 위해서 콘크리트 실험배합표를 작성하고 콘크리트 실험을 통하여 각 조합에 대한 콘크리트 품질 데이터를 확보했다.

배합실험 결과 얻은 콘크리트의 슬럼프, 공기량 그리고 압축강도를 살펴보면 배치믹스 2와 4가 지연시간과 양생온도 변화에도 불구하고 우수한 품질을 가지는 것을 알 수 있다. 배치믹스 2는 지연시간 변화에도 불구하고 가장 높은 슬럼프를 가지며, 배치믹스 4 또한 비교적 우수한 슬럼프를 가졌다. 배치믹스 2와 4는 공기량에서는 배치믹스 1과 3에 비하여 작게 나타났다. 배치믹스 2와 4는 콘크리트 압축강도의 경우 양생온도 15℃와 25℃에서 모두 가장 높은 압축강도를 가지는 것으로 나타났다. 다구찌 방법을 활용한 SN비 분석에서는 배치믹스 2가 가장 높은 평균 압축강도를 가지며, 또한 가장 높은 SN 값을 가지는 것으로 나타났다. SN비 값이 높다는 것은 배치믹스 2가 외부영향요인의 변화에 가장 내구성이 강하다는 것을 의미한다. 콘크리트 배치믹스 설계시 SN비 값을 활용하면 현장여건의 변화에도 불구하고 가장 우수한 콘크리트 품질을 유지하는 배합설계를 할 수 있다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 외부영향요인과 내부영향요인을 각각 두 개씩 선정하고, 각 요인에 대하여 2수준으로 실험을 했다. 그러나 실제 실무에 적용하기 위해서는 현장특성에 맞도록 외부영향요인을 선정해야 할 것이며, 내부영향요인을 중요도에 따라서 적용해야 한다. 또한 외부영향요인과 내부영향요인의 수준을 3 레벨 이상으로 설정하여 실무 적용성을 높일 수 있을 것이다. 본 연구에서는 제한된 실험을 통하여 연구결과를 유도했으나 향후 특정현장을 대상을 선정하고, 실험범위를 확대하여 연구성과를 높일 수 있을 것이다.

감사의 글

본 논문은 2015년도 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2015R1D1A1A01059487).

References

- Han, C. K. (1998). Concrete characteristics and mix design for quality control engineers, Kimoondang.
- Kim, M. O., Qian, X., Lee, M. K., Park, W. S., Jeong, S. T., and Oh, N. S. (2017). "Determination of Structural Lightweight Concrete Mix Proportion for Floating Concrete Structures," *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 29(6), pp. 315-325.
- Jung, Y. B., Yang, K. H., and Tae, S. H. (2016). "Mixture Proportioning Approach for Low-CO₂ Lightweight Aggregate Concrete based on the Replacement Level of Natural Sand," *Journal of the Concrete Institute*, 28(4), pp. 427-434.
- Kim, J. H., Oh, I. S., Phan, D. H., and Lee, K. S. (2010). "Application of Performance Based Mixture Design (PBMD) for High Strength Concrete." *Journal of the Korean Society of Civil Engineering*, 30(6A), pp. 561-571.
- Lee, S. C., Feng, M. Q., and Kwon, S. J. (2010). "Concrete Mixture Design for RC Structures under Carbonation - Application of Genetic Algorithm Technique to Mixture Conditions." *Journal of the Korea Concrete Institute*, 22(3), pp. 335-343.
- Lee, S. S., Won, C., Park, S. J., and Kim, D. S. (2001). "A study on the Mix Design and the Control of thermal Crack of Mass Concrete." *Proceedings of Korea Concrete Institute*, 13(1), pp. 533-538.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transportation (2009). Concrete Standard Specification.
- Oh, J. W., Lee, J. H., and Lee, I. W. (1997). "Use of Neural Networks on Concrete Mix Design." *Korea Concrete Institute*, 9(2), pp. 145-151.
- Oh, J. H., Lee, S. K., and Kim, Y. S. (2013). "A Study on Optimum Mix Design Model of 60MPa High Strength Concrete Using Neural Network Theory." *Proceedings of Architectural Institute of Korea*, 33(1), pp. 509-510.
- Taguchi (1986). Introduction to quality engineering, Asian Productivity Organization, Tokyo.

Appendix I: Mix Design Table (Concrete Strength 24MPa)

Batch Mix	Level of internal and external factors				Mix design					External factors	
	S/A ratio	Admix-ture	Delay time	Curing time	Water (kg/m ³)	Cement (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Aggre-gate (kg/m ³)	Admix-ture (kg/m ³)	Delay time (min)	Curing temp (oC)
1	(1)	(1)	(1)	(1)	175	330	835	930	1.2	0	15
	(1)	(1)	(1)	(2)	175	330	835	930	1.2	0	25
	(1)	(1)	(2)	(1)	175	330	835	930	1.2	30	15
	(1)	(1)	(2)	(2)	175	330	835	930	1.2	30	25
	(1)	(1)	(3)	(1)	175	330	835	930	1.2	60	15
	(1)	(1)	(3)	(2)	175	330	835	930	1.2	60	25
2	(1)	(2)	(1)	(1)	175	330	835	930	1.6	0	15
	(1)	(2)	(1)	(2)	175	330	835	930	1.6	0	25
	(1)	(2)	(2)	(1)	175	330	835	930	1.6	30	15
	(1)	(2)	(2)	(2)	175	330	835	930	1.6	30	25
	(1)	(2)	(3)	(1)	175	330	835	930	1.6	60	15
	(1)	(2)	(3)	(2)	175	330	835	930	1.6	60	25
3	(2)	(1)	(1)	(1)	175	330	918	848	1.2	0	15
	(2)	(1)	(1)	(2)	175	330	918	848	1.2	0	25
	(2)	(1)	(2)	(1)	175	330	918	848	1.2	30	15
	(2)	(1)	(2)	(2)	175	330	918	848	1.2	30	25
	(2)	(1)	(3)	(1)	175	330	918	848	1.2	60	15
	(2)	(1)	(3)	(2)	175	330	918	848	1.2	60	25
4	(2)	(2)	(1)	(1)	175	330	918	848	1.6	0	15
	(2)	(2)	(1)	(2)	175	330	918	848	1.6	0	25
	(2)	(2)	(2)	(1)	175	330	918	848	1.6	30	15
	(2)	(2)	(2)	(2)	175	330	918	848	1.6	30	25
	(2)	(2)	(3)	(1)	175	330	918	848	1.6	60	15
	(2)	(2)	(3)	(2)	175	330	918	848	1.6	60	25

요약 : 콘크리트 타설현장의 조건은 콘크리트 강도에 커다란 영향을 주며, 따라서 콘크리트 배합은 콘크리트 타설시 현장조건을 반영할 수 있도록 설계되어야 한다. 즉, 콘크리트 배합은 현장양생온도, 작업환경, 타설방법 등을 고려하여 최적화하는 노력이 필요하다. 본 연구목적은 현장 콘크리트 타설시 발생하는 양생온도와 작업지연 등 외부영향인자를 고려하여 가장 대응을 잘 할 수 있는 콘크리트 배합설계를 제공하는 것이다. 연구목적은 달성하기 위해서 본 연구에서는 로버스트 설계방법을 콘크리트 배합설계에 적용했다. 사례분석에서는 양생온도와 작업지연 등 외부영향요인과 함께 콘크리트 성분의 조합을 적용하여 콘크리트 실내 테스트를 실시했다. 실험결과 로버스트 설계방법을 적용할 경우 외부영향요인이 주어졌을 때 가장 효과적으로 대응을 할 수 있는 콘크리트 배합설계를 선정할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

키워드 : 콘크리트 배합설계, 콘크리트 강도, 로버스트 설계방법, 내부영향요인, 외부영향요인