레디믹스트 콘크리트 플랜트의 회수수 농도 측정 자동화에 관한 연구

최영철* · 문규돈 · 조봉석*

한국건설생활환경시험연구원 · *포항산업과학연구원
(2014. 5. 9. 접수 / 2014. 7. 24. 채택)

A Study on the Automatic Measurement of Solid Content in Recycled Water in Ready Mixed Concrete Plant

Young-Cheol Choi* · Gyu-Don Moon · Bong-Seok Cho*

Korea Conformity Laboratories · *Research institute of Industrial Science & Technology
(Received May 9, 2014 / Accepted July 24, 2014)

Abstract : Whole amount of waste water, approximately 921.6 liter, for cleaning a ready mixed concrete truck should be used to produce concrete as a mixing water or cleaning water. Recycling water for concrete mixing contains solids, which cause decrease in slump, air and compressive strengths, so it may influence on poor concrete quality. Therefore, it has been maintained to use recycling water with less than 3 percent of solids. Since no evaluation system has been constructed to directly reflect on variability of recycling water from ready mixed concrete plants, it is necessary to develop "Automatic recycling solid measuring system" for quality controls in real time. In this research, sensors measuring waste water concentration in ultrasonic and inductance methods were developed, and automatic system using the sensors were established. The accuracy of measurement sensors developed for recycling water based on various conditions of concentration was proved, and application limits were evaluated. Also, concentration of recycling water using sensors developed from ready mixed concrete plant was measured, and curing method verified the accuracy of the sensors. Moreover, measurement sensors for recycling water in various locations were installed to evaluate the effects on measuring method and spots. The automatic measuring system for recycling water concentration, which is developed in the research, will contribute to improve concrete quality safety through reliable solids maintenance.

Key Words : recycled water, solid content measurement, ready mixed concrete, quality control

1. 서론

건설산업에서 레디믹스트 콘크리트는 사회기반시설 물 등 국가 인프라 구축에 중요한 역할을 담당하는 재료로 2010년도 레디믹스트 콘크리트 출하실적이 6조 4천억원에 달하는 거대한 시장규모를 가지고 있으나, 불량 레디믹스트 콘크리트 납품과 같은 지속적인 문제점은 국민의 안전과 직결되어 사회적으로 이슈화 되고 있다¹⁾.

레디믹스트 콘크리트 생산현장의 경우 대량의 콘크리트를 제조, 운반 작업이 종료된 후에는 후속 콘크리트 제조 시 배합비의 정밀을 기하거나, 장비의 보존을 위하여 레디믹스트 콘크리트 트럭의 드럼 내 · 외부 및 배치 플랜트의 믹서 · 호퍼 등을 세척하게 되고 이에 따라 레디믹스트 콘크리트 세척 배수가 발생하게 된다²⁾. 배수는

레디믹스트 콘크리트 일일 생산량 500 m³/day, 레디믹스트 콘크리트 차량대수 20대를 기준으로 하였을 경우, 안전을 고려한 실제 발생량이 76.8 m³가 되고 이를 레디믹스트 콘크리트 1 m³당으로 환산하면 153.6 ℓ/m³, 즉 레디믹스트 콘크리트 1차당 921.6 ℓ의 막대한 양의 레디믹스트 콘크리트 세척 배수가 발생한다.

이와 같이 레디믹스트 콘크리트 생산현장에서 발생한 세척 배수는 수질 및 토양오염 등 환경오염을 유발함에 따라 환경보전 차원에서 또한 수질환경보전법 시행규칙을 만족시키기 위해 레디믹스트 콘크리트 제조시 혼합수 및 세척용수로서 100% 전량 활용하도록 법제화 되어 있다. 국내 세척배수 관련 규정은 KS F 4009(레디믹스트 콘크리트)의 부속서 2에서는 고형분율 3% 이하로 규정하고 있다³⁾. 그러나 고형분율을 측정하기 위해서는 일정량(500 ml)을 채취하여 향량이

* Corresponding Author : Young-Cheol Choi, Tel : +82-2-2102-2754, E-mail : zero@kcl.re.kr

High-tech Construction Materials Center, Korea Conformity Laboratories, 199, Gasan-Digital 1-ro, Geumcheon-gu, Seoul 153-803, Korea

될 때 까지 105~110℃의 건조기에 넣고 건조 전후의 중량변화를 통해 계산하게 되어 있기 때문에 회수수를 사용하여 레디믹스트 콘크리트를 제조하는 시기는 현재이지만 고형분율 측정이 끝나는 시간은 최소 6시간 ~ 최대 24시간이 걸려 사용시간과 측정시간과의 시간 차가 발생하는 모순점이 존재하여 레디믹스트 콘크리트 품질관리에 어려움이 발생하고 있다⁴⁾.

또한 상기한 바와 같이 레디믹스트 콘크리트 플랜트에서 실시간으로 회수수 고형분율의 품질관리가 곤란함에 따라 매일 고형분율을 측정하지 못하고 있을 뿐만 아니라 육안관찰만으로 고형분율을 추정하여 관리자의 경험에 의해 수돗물(청수)을 추가하는 정도의 품질관리가 이루어지고 있다.

레디믹스트 콘크리트 품질관리를 위해 표준화된 시험방법 및 품질관리 방안 등이 지침 및 KS 규정(소프트웨어)을 통해 시행되고 있지만, 품질관리 자동화 시스템에 대한 기반시설(하드웨어)에 관한 기술개발 연구 및 인프라가 미흡한 상황이다. 이러한 실정을 고려하여, 레디믹스트 콘크리트 품질관리의 신뢰성을 구조적으로 향상시키고 건설생산현장에서의 합리적, 효율적, 정량적인 콘크리트 품질 관리 시스템의 기반을 구축하여 건설안전에 직접적으로 영향을 미치는 레디믹스트 콘크리트 품질을 실시간으로 관리할 수 있는 회수수 고형분 측정 자동화 시스템 개발의 필요성이 절실한 실정이다.

본 연구는 레디믹스트 콘크리트 제조 시 혼합수로 사용되는 회수수의 농도를 정확히 측정할 수 있는 자동 측정 장치 및 시스템 개발을 통해 건설분야 주요 핵심 재료의 품질향상을 통해 안전성 향상에 기여하고자 한다. 구체적으로 초음파 방식과 유도 인덕턴스 방식의 측정센서를 개발하였으며, 다양한 조건에서의 실내 실험과 실제 레디믹스트 콘크리트 현장평가를 통해 그 정확성을 검증하였다.

2. 레디믹스트 콘크리트 회수수

2.1. 개요

콘크리트는 시멘트의 수화반응으로 시간이 경과함에 따라 경화되는 재료이기 때문에 레디믹스트 콘크리트 생산 시 기기 및 장비 등에 부착된 콘크리트는 가수 혼합 등으로 분해가 불가능하므로 콘크리트 제조 및 운반 작업이 종료된 후 즉시 세척해야 한다. 즉 레디믹스트 콘크리트 생산 현장에서와 같이 대량의 콘크리트를 제조할 경우 일단의 콘크리트가 생산 완료된 후 레디믹스트 콘크리트 트럭의 드럼 내·외부 및 배척플랜

Fig. 1. Concept of recycling water.

트의 믹서·호퍼 등의 세척은 후속 콘크리트 제조 시 배합비의 정밀을 기하거나, 장비의 보존을 위해 반드시 필요하게 되는데, 이때 발생하는 세척배수에서 골재를 제거한 것을 회수수(Fig. 1)라 한다⁵⁾.

슬러지수는 콘크리트의 세척 배수에서 굵은 골재, 잔골재를 분리·회수하고 남은 현탁수, 상징수는 슬러지수에서 슬러지 고형분을 침강 또는 그 밖의 방법으로 제거한 물로 정의된다. 슬러지 고형분은 슬러지를 105~110℃의 고온에서 건조하여 얻어진 것을 의미하며, 고형분률은 콘크리트의 배합에서 단위시멘트량에 대한 슬러지 고형분의 무게비율을 백분율로 표시한 것이다³⁾.

레디믹스트 콘크리트 공장에서 발생하는 배수는 크게 공정배수와 비공정배수로 구분하고 있다. 공정배수는 배치 플랜트 세척수, 에지테이터 트럭 내부의 세척수, 트럭 외부의 세척수, 반폼레미콘 처리수 등의 콘크리트 제조공정 내에서 발생하는 배수를 말하고, 비공정배수는 보일러수 및 냉각수 등의 제조공정 시설에서 발생하는 배수를 의미한다. 기타 잡용수에 의한 배수로는 공장바닥 세척수 및 우기의 부지 내 유출수 등으로 분류되고 있다.

2.2. 회수수 성분

세척배수의 구성성분은 사용재료, 레미콘 품질, 씻기에 사용된 물의 양 등 다양한 요인에 의해 달라질 수 있다. 세척배수의 구성은 물이 95%로 대부분을 차지하고, 잔골재 4%, 굵은 골재와 시멘트는 1% 전후를 보이고 있다. 세척배수의 pH는 발생량과 반비례 관계를 나타내는데 11~12 범위이다²⁾. 잔골재와 굵은 골재를 제거한 회수수의 고형분율도 세척배수 발생률과 반비례 관계를 갖는데 3% 전후의 분포를 나타낸다. 레미콘 회수수 중 상징수 내의 화학성분 중 용해성분들은 주로 미수화시멘트 주변에 형성된 시멘트 겔의 피복으로 수

화작용이 30분에서 2시간 이상 지체되는 유도기(induction period) 과정에서 상징수 내로 용해되는 Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} 성분이 주를 이루는데 Ca^{2+} 의 농도는 시간의 경과에 따라 증가된다. 슬러지의 경우 시멘트 성분과 미세한 잔골재 성분에 기인하여 CaO 량이 가장 많고, SiO_2 , SO_3 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 순이며, 강열감량도 25%를 차지하고 있다⁵⁾.

2.3. 슬러지 고형분율이 콘크리트 물성에 미치는 영향

콘크리트의 배합수로 사용되는 회수수의 슬러지 고형분율이 증가하면 슬럼프는 저하한다⁵⁻⁸⁾. 특히 된 비빔 배합, 작은 물-시멘트비, 회수수 발생기간이 많이 경과된 경우에서는 저하가 크다. 단, 빈배합에서 미립자량이 부족하여 재료분리를 일으킨 경우에는 오히려 양호한 결과를 나타낸다. 따라서 레미콘 배합설계에서는 슬러지 고형분율이 증가할수록 단위수량을 증가시키거나, 감수제의 사용량을 증가시켜 저하된 유동성을 회복시키고, 또한 높아진 점성에 따라 잔골재율을 낮춰주는 배합보정이 필요하게 된다.

또한, 슬러지 고형분율이 증가하면 공기량은 감소한다. 이는 슬러지의 미립분이 콘크리트 조직 중 공극을 양호하게 충전하는 것에 기인한다. 특히 공기량은 물-시멘트비가 작을수록, 온도가 높을수록, 회수수 발생기간이 많이 경과된 경우에서 저하가 크게 된다⁵⁻⁸⁾. 공기량의 감소치는 상수를 사용한 콘크리트에 비하여 고형분 첨가율 1%당 0~3% 정도 저하하는 것으로 알려지고 있다. 따라서 AE제 첨가량은 슬러지 고형분량이 1% 증가함에 따라 대략 8~12% 만큼 증가시킬 필요가 있다.

응결시간의 경우는 슬러지 고형분율이 증가할수록 초결 및 종결시간이 빨라지는데⁹⁾, 대략 고형분율을 3% 일 때는 30분 정도의 단축으로서 실용상으로는 거의 문제되지 않는다. 블리딩량은 고형분율이 증가할수록 감소한다. 그러나 응결시간과 마찬가지로 블리딩량의 감소치는 고형분량 3%에 대해서 대략 1~1.5% 정도로서 실용상에는 거의 문제가 없다. 따라서 슬러지 고형분율 증가는 블리딩을 적게 하고, 응결시간을 빠르게 하기 때문에 서중콘크리트 시공에서는 타설된 콘크리트의 마감시기를 놓치지 않도록 신중한 배려가 요구된다.

일정 범위의 슬러지 고형분율에 대해 콘크리트 압축강도에 대한 영향은 미미하거나 약간 증가한다. 또한 물-시멘트비, 반죽질기 및 공기량을 상수를 이용한 콘크리트와 같게 하고, 여기에 슬러지 고형분을 시멘트에 대하여 3% 이하로 첨가한다면 여러 가지로 시험조건을

다르게 해도 큰 차이가 없는 것으로 보고되고 있다⁵⁻⁶⁾. 휨강도, 인장강도, 부착강도, 동탄성계수는 슬러지 고형분율이 증가함에 따라 압축강도의 경향과 유사하게 거의 변화 없는 것으로 나타난다. 즉 압축강도 이외의 역학적 성질은 슬러지 고형분율이 단위시멘트량에 대하여 3% 이하인 조건이라면 거의 동등하게 된다⁷⁻⁸⁾.

콘크리트 조성 중 미립분이 증가하면 건조수축은 증가하는 것이 일반적이지만, 슬러지 고형분율 변화에 따른 건조수축률은 전반적인 경향은 큰 변화가 없고, 경우에 따라 최밀 충전 조건에서는 오히려 작아진다⁸⁾.

2.4. 회수수 사용기준

국내의 경우 회수수에 관련된 기준은 KS F 4009에 규정하고 있으며, 슬러지를 사용하였을 경우 슬러지 고형분율이 3%를 초과하지 않도록 규정하고 있다. 또한 염소이온의 양은 250 mg/L 이하이며, 시멘트 초결은 30분 이내, 종결은 60분 이내의 응결시간 차이를 두고 있다³⁾.

일본 콘크리트공학협회의 회수수 연구위원회 보고서에서는 회수수 사용기준을 다음과 같이 제시하고 있다⁵⁾.

- 상정수는 배합수로서 상수와 똑같이 사용해도 좋다.
- 슬러지수는 다음 4가지 항목을 만족할 경우 사용해도 좋다.
 - : 슬러지 고형분은 시멘트 중량의 3% 이하로 한다.
 - : 물-시멘트비와 컨시스턴시를 일정하게 하기 위하여 슬러지 고형분 1%에 대해 단위수량, 단위시멘트량을 1~1.5% 증감한다.
 - : 잔골재율은 슬러지 고형분 1%에 대하여 약 0.5% 감한다.
 - : AE제의 양은 고형분량에 따라 증가시키고, AE 감수제에 대해서도 필요에 따라 공기량 조정제를 증가시킨다.

일본은 JIS A 5308의 의해 슬러지수를 생산자의 판단에 의하여 사용할 수 있도록 회수수 품질기준, 슬러지 고형분율 및 슬러지수 관리방법 등에 대하여 규정¹⁰⁾하고 있으며, Fig. 2와 같이 레미콘 공장에서 관리하고 있다. 회수수의 품질기준은 슬러지 고형분율은 3%를 초과하지 않도록 규정하고 있으며, 슬러지수 관리방법도 배치 농도조절방법, 연속농도측정방법으로 규정하고 측정빈도와 측정 기록 등 요구사항에 대하여 기술하고 있다. 또한 연속농도측정방법을 사용하여 슬러지수를 관리하는 경우 자동농도계를 사용하여 측정·기록하도록 하고 있다^{5,10)}. 미국과 유럽의 경우에도 ASTM C 94,

Fig. 2. Sludge water maintenance method – examples of continuous concentration measurement method.

EN 1008을 통해 회수수 사용에 관한 기준을 규정하고 있다¹¹⁾.

3. 회수수 고형분 측정 자동화 시스템

3.1. 개요

회수수를 사용하여 레디믹스 콘크리트를 제조할 때는 콘크리트 배합에서 단위 결합재량에 대한 슬러지 고형분(슬러지는 105℃~110℃에서 건조시켜 얻어진 것)량의 비율을 백분율로 환산한 단위 슬러지 고형분율이 3% 이내에 있어야 레디믹스 콘크리트의 품질 규격을 만족시키게 되는 것이다.

레디믹스 콘크리트 제조 공장에서는 슬러지수를 사용할 경우 슬러지 농도를 측정하고 이에 따라 슬러지 농도를 일정 수준에 맞도록 조절하여야 할 필요성이 있다.

이러한 슬러지 농도를 측정하는데 사용되는 종래의 슬러지 농도 측정기는 슬러지수의 농도를 측정하는 복수개의 농도 측정센서들이 구비되는데, 이러한 농도 측정센서들은 빛을 방출하는 발광부와 발광부로부터 방출된 후 슬러지 입자에 의해 반사된 빛이 입사되는 수광부로 이루어져 수광부에 흡광되는 광량에 의해 농도를 측정하는 광센서가 주로 적용된다.

종래의 농도 측정센서는 발광부 및 수광부가 처리조 내부에서 측정수에 직접 접촉되도록 설치되므로 센서의 발광부 및 수광부에 슬러지가 고착하여 성장하게 되고 이러한 센서 표면에 고착된 슬러지에 의해 흡광이 제대로 이루어지지 않아 농도 측정이 부정확하게 이루어지게 되는 문제가 있었다. 이로 인하여 주기적으로 슬러지 농도를 측정하는 센서들을 처리조에서 꺼내어 표면에 부착된 슬러지들을 깨끗이 제거한 후 센서들을 처리조 내에 재설치하였다. 하지만 이처럼 처리조에서 센서를 분리하고 재설치하는 작업은 매우 어

렵고 시간이 많이 소요되었다.

또한, 종래의 슬러지수 농도를 측정하는 또 다른 방법으로 슬러지수 탱크의 소정 깊이에 침전된 슬러지수 샘플을 직접 채취하여 그 농도를 분석하는 방식도 이용되고 있으나 이와 같은 방식은 분석에 필요한 시간이 길고 탱크에서의 슬러지 농도 변화가 심하기 때문에 상시적으로 정확한 슬러지 농도를 측정하는 것이 어렵다. 레미콘 제조 현장에서 회수수를 최대한 재활용하기 위해서는 슬러지수 농도를 실시간으로 모니터링할 수 있고, 신뢰도 높은 분석결과를 제공할 수 있는 농도 측정 시스템이 필요하다.

3.2. 초음파식 농도 측정 시스템

초음파식 농도 측정 시스템은 회수수 탱크 내부의 슬러지수에 초음파 센서부를 침지시키고 Controller를 조작하여 초음파 센서로부터 초음파를 발생시키면 이에 대응되는 반대편 초음파 센서가 전달된 초음파를 받아서 Controller에 전기적인 신호로 전달하며, Controller는 초음파의 감쇄율을 이용하여 슬러지수의 농도를 계측하게 된다(Fig. 3).

또한, 한 쌍의 초음파 센서에는 고압의 에어를 분사시킬 수 있도록 에어 세정노즐이 설치되어 있다. 따라서 압축펌프에 의해 고압의 에어가 충전된 에어 보조 탱크에서 에어 세정노즐 측으로 에어가 공급되면 고압의 에어가 노즐에서 분사되면서 초음파 센서의 초음파 발진 부위를 세척하게 된다. 세정노즐 장치는 초음파 센서에 슬러지수에 포함된 슬러지가 고착되는 것을 방지시킬 수 있으며, 이에 따라 슬러지수의 농도측정을 정확하게 측정할 수 있다. 초음파 센서에 이물질이 고착되지 않기 때문에 이를 제거하기 위해 작업 중인 초음파 센서부를 탱크로부터 꺼내서 세척해야 하는 불편

Fig. 3. Measuring principle of sensors for ultrasonic method.

Fig. 4. Concentration measuring system for ultrasonic method.

이 해소되며, 농도 측정 작업의 효율성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 초음파식 농도 측정 시스템은 Fig. 4와 같이 슬러지수 탱크의 슬러지수에 잠기도록 설치되어 슬러지수의 농도 및 온도를 측정하는 초음파 센서부, 초음파 센서부에 설치되어서 초음파가 발생되는 부위에 부유물이 침착되는 것이 방지되도록 에어를 분사하여서 세척하는 세척부, 고압의 에어가 저장되며 상기 세척부에 연결되어 이에 고압의 에어를 공급하는 에어보조탱크, 에어를 공급하는 압축펌프, 기기를 제어할 수 있는 Controller로 구성되었다.

Fig. 5는 초음파 센서를 이용한 회수수 고형분 측정 시스템을 표준 농도의 슬러지 수 시료를 제작하여 센서를 이용한 측정값과 실제 농도를 비교 분석한 검량선 결과이다.

실험을 통해 얻은 시료 농도는 최종적으로 식 (1)을 활용하여 콘크리트 배합용 단위 슬러지수 고형분율을 산출하는데 활용할 수 있다.

$$\text{단위 슬러지수 고형분율}(\%) = \frac{S_s}{B} \times 100 \quad (1)$$

여기서, B는 단위결합재량(kg), SS는 슬러지 고형분

Fig. 5. Interaction formula between measuring values and sludge water concentration.

Table 1. Measured result of sensors by ultrasonic method

Target value (%)	Oven dry value (%)	Test results (%)
5	5.2	5.35
10	10.5	10.23
15	15.8	14.92
20	21.2	20.45
25	24.8	24.30
30	30.4	25.27
35	35.5	27.67
40	40.3	26.83

량(kg) = $\frac{W_s \times C_s}{100}$, W_s 는 1 m³ 배합에 사용하는 슬러지수의 질량(kg), C_s 는 슬러지수 농도(%)를 나타낸다.

Table 1은 다양한 농도(5~40%)의 표준 슬러지수에 대해 초음파식 측정센서의 성능평가를 수행한 결과이다. Table 1과 같이 저농도 영역(15% 이하)의 경우 건조법에 의한 결과값과 유사한 경향을 나타내고 있으나 15% 이상인 경우 초음파 신호의 투과력이 감소함에 따라 농도 측정에 어려움이 있다는 것을 확인할 수 있다. 센서 부위의 세정력을 향상시키기 위하여 세정 센서 노즐을 추가 부착(1개→2개) 하고 초음파 파장 출력을 높였으나 20% 이상의 고농도 영역에서는 일정시간 이후에는 노즐 주위에 부유물의 흡착으로 인하여 세정 효과가 감소하는 것을 알 수 있었다. 이러한 문제로 초음파식 측정센서는 실제 레디믹스트 콘크리트 현장에 적용하는 데 한계가 있는 것을 확인하였다.

3.3. 유도 인덕턴스 방식 농도 측정 시스템

유도 인덕턴스 방식의 농도 측정 시스템은 외부로부터 유입되는 슬러지수의 유도 전압을 측정하는 센서부, 센서부에서 측정된 유도 전압에 관한 신호를 전송받아 그 신호를 이용하여 농도를 연산하는 프로세서부, 농도에 관한 결과를 표시하는 표시부로 구성되어 있다. 센서부는 내부에 시료가 통과하도록 링 모양으로 형성되어 있으며 표면에 제1, 제2토로이드 코일이 감겨져 있다. 제1토로이드 구조물은 프로세서부로부터 교류전압을 인가받아 그 내측으로 측정대상 시료가 통과하면 유량에 따른 전기장 및 자장과 이로 인한 원형의 유도 교류 전류를 발생시키고, 제2토로이드 구조물은 유도 교류 전류에 의하여 유도 기전력 및 유도 전류를 발생시키며, 프로세서부는 유도전류에 의한 유도 전압 신호를 전송받아 시료의 농도를 연산한다. 기전력 발생 원리는 플레밍의 오른손 법칙과 같다. N극, S극 자장 공간 내에 배관(또는 튜브)을 설치하고 이동 도체 대신

에 유체를 흘려주면 자장의 방향과 유체의 방향에 직각인 제3의 방향으로 기전력이 발생하게 되며, 이러한 기전력은 자속 밀도와 유체의 전도도에 비례하기 때문에 자속밀도만 일정하다면 유체의 전도도와 기전력이 비례하게 된다.

따라서 전극을 통하여 기전력만을 측정하여 기전력과 유체의 전도도와의 관계를 이용하여 유체의 농도를 검출할 수 있다. 프로세서부에서 수행되는 유도전류에 대한 연산 알고리즘에 대해 설명하면 유도전류의 계산은 페러데이(Faraday) 법칙에 의해 구할 수 있다. 자장 공간 내에서 자속밀도 B인 자력선을 직각으로 끊는 방향으로 도체가 이동(이동속도 v)하면, 이동하는 도체를 중심으로 Z축인 도체 이동방향과 Y축인 자계 방향의 직각인 X축 방향으로 기전력이 발생하며, 기전력 크기는 자속밀도와 자력선을 끊는 속도인 도체 이동방향의 속도에 비례하는 법칙을 의미한다.

이러한 페러데이 법칙이 농도 측정방법에 적용되는 경우 우선 자속밀도의 변화에 따른 제2토로이드 구조물에 유도되는 기전력을 측정해야 한다. 제1토로이드 구조물에 의하여 제2토로이드 구조물에 자속이 흐르게 되고 그 결과 식 (2)와 같은 유도 기전력이 발생한다.

$$V = - \frac{d\Phi_m}{dt} \quad (2)$$

여기에서 $d\Phi$ 는 자속 밀도 변화, dt 는 시간 변화를 의미하며, 음의 부호는 방향이 반대임을 의미한다.

유도 기전력은 제2토로이드 구조물에 코일이 감긴 횟수만큼 비례하기 때문에 V는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = - N \frac{d\Phi_m}{dt} \quad (3)$$

여기에서 N은 코일이 감긴 횟수

이렇게 구한 유도 기전력을 옴의 법칙을 이용하여 식 (4)와 같이 유도 전류를 구할 수 있다.

$$I = - N \frac{d\Phi_m}{Rdt} \quad (4)$$

여기에서 R은 코일 저항의 크기를 나타낸다.

인덕턴스 방식의 측정 시스템 성능을 평가하기 위하여 실험실에서 청수에 비표면적 $5,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 급의 석회석 미분말을 투입하여 농도가 다른 총 8개의 시료(5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%)를 제조하고 이를 활용해 건조법과 비교 실험을 실시하였다(Fig. 6).

Fig. 6. Indoor evaluation of measuring system by inductance method.

Fig. 7. Experiment result of measurement system by inductive inductance method.

실험 결과 Fig. 7과 같이 농도 5~40%의 전범위에서 양호한 결과를 보이고 있다.

4. 실제 레디믹스트 콘크리트 현장 성능평가

본 연구에서는 실내실험에서 우수한 성능을 보인 인덕턴스 형태의 측정센서를 이용하여, 실제 레디믹스트 콘크리트 현장에 적용성 평가를 수행하였다. 적용된 레디믹스트 콘크리트 공장은 경기도에 소재한 A사이며, 가동 기간 중에 자동적으로 연속 측정(10분당 1회 측정)하였으며, 1일 2회 현장시료 채취 후 건조법을 사용하여 슬러지 농도를 측정하고 시스템 측정값과 비교하였다.

Fig. 8과 같이 현장에서의 슬러지수 농도 측정을 위한 샘플링 방법은 실내 시험에서 사용했던 방식인 수중 펌프식으로 회수수 탱크 내부에 설치한 수중 펌프를 이용하여 슬러지수가 관을 따라 센서부로 이송되도록 하였다. 센서부의 이물질 고착으로 인하여 측정능력이 저감되는 것을 방지하기 위하여 센서부 양쪽에

Fig. 8. Field performance evaluation systems.

고압으로 물을 분사할 수 있는 세정장치를 부착하였다.

하지만, 수중 펌프를 이용한 방법은 건조법에 의한 결과와 현저한 차이가 발생하였으며, 이는 탱크 내부에 설치한 수중펌프에서 센서부로 동일한 양과 유속의 슬러지수가 공급되지 않는 것이 원인으로 판단되었다. 이는 슬러지수 사용량에 따라 탱크 내부의 수위가 변동되기 때문인 것으로 확인되었다. 이러한 문제를 해결하기 위해 수중펌프를 가능한 탱크 최하단부에 설치하였으나 최하단부의 경우 상부보다 상대적으로 이물질이 많기 때문에 수중펌프의 출력이 낮아지고, 시간이 경과할수록 수중펌프 표면 전체가 Fig. 9와 같이 고착되어 정상적으로 펌프가 작동하지 못하였다.

수중펌프를 사용한 샘플링 방식의 문제를 원천적으로 해결하기 위하여 기존 방법과는 다른 새로운 샘플링 방식을 시도하였다. Fig 10과 같이 레미콘 생산현장의 batch plant로 회수수를 이송하는 main 배관에 분관을 설치하여 일정량을 샘플링하는 방식으로 변경하여 측정하였다. 이와 같은 샘플링 방식을 통하여 수중펌

Fig. 9. Sampling problems in field test.

Fig. 10. Sampling method through main pipes.

프로 인한 문제를 해결하는 동시에 기존에 압력손실에 의해 발생하는 관내의 불규칙한 유량과 유속문제(헨팅)도 해결할 수 있었다. 또한 main 배관에서 센서부로 연결하는 배관들의 길이도 최적화하여 배관에 고인 시료가 고착되던 문제도 개선하였다. 이와 같은 샘플링 방식의 추가적인 장점은 main 배관에서 직접 샘플링을 하기 때문에 기존에 저장 탱크에서 수중펌프를 통해 샘플링하는 방식에 비하여 상대적으로 배합시 사용되는 회수수와 동일한 조건의 시료를 샘플링하여 측정할 수 있다.

Table 2와 같이 Main 배관에서 샘플링하는 방식으로 실시한 현장 실험결과 전체 기간 동안의 최대 농도는 29.01%, 최소 농도는 8.31%를 나타냈으며 전체 기간 동안의 평균 농도는 18.66%이다. 1일 평균농도의 경우 최대 23.04%, 최소 12.06%이고 1일 최대 농도 차이는 15.14%로 나타났다. 실험 현장의 경우 일 평균 농도 차이(해당일 평균농도-전일 평균농도)뿐만 아니라 해당일 최대 농도와 최소 농도 차이가 큰 특징을 나타내고 있다. 이와 같은 농도 변동은 레미콘 출하량, 회수수 사용량, 강수량 등 다양한 요인에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 11은 유도 인덕턴스 방식의 측정센서를 이용하여 자동 측정된 회수수의 농도와 1일 2회 현장에서 회수수를 직접 샘플링하여 105℃의 고온에서 건조시켜 항량된 결과를 이용해 산정한 농도와의 비교를 나타내고 있다.

Table 2. Field experiment results – Sludge concentration

Date	Max(%)	Min(%)	Ave(%)	SD
10.28	19.97	18.88	19.47	0.25
11.01	25.00	21.30	23.04	1.03
11.03	25.84	17.79	21.31	2.60
11.04	21.63	11.50	16.46	3.81
11.07	21.92	15.35	17.69	2.22
11.09	23.48	21.27	22.08	0.66
11.10	23.67	20.19	22.92	0.81
11.14	22.58	14.04	17.94	2.95
11.15	17.49	16.00	16.61	0.43
11.16	18.64	14.77	17.06	0.99
11.17	18.59	15.76	17.10	0.87
11.21	18.24	16.40	17.41	0.44
11.22	24.73	20.19	22.17	1.50
11.25	29.01	13.87	20.72	5.45
11.28	21.73	17.76	19.58	1.13
11.29	13.84	8.31	12.06	1.31
12.01	17.85	13.57	15.35	1.27
12.02	17.82	15.82	16.89	0.49

Fig. 11. Field experiment results on sludge concentration.

Fig. 12. Field experiment result errors on sludge concentration measurement.

또한, 현장 실험결과 슬러지 농도 측정 오차는 Fig. 12와 같이 모두 $\pm 5\%$ 이내로 나타났다.

이와 같이 실시간 측정된 농도값을 통해 실제 레미콘 생산 현장에서 슬러지 고형분을 산정에 기초 자료로 활용되어 청수와 슬러지수 사용량을 결정하게 된다.

5. 결론

본 연구에서는 레디믹스트 콘크리트 플랜트에서의

혼합수로 사용되는 회수수의 고형분량을 측정할 수 있는 자동 측정 장치 및 시스템을 개발하였으며, 그 성능을 다양한 실험을 통해서 비교 검증하였다. 측정 센서의 개발 및 실제 현장 적용성을 살펴 본 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 초음파의 감쇄율을 이용하여 슬러지수의 농도를 측정하는 측정장치를 개발하였으며, 실내 실험결과 저농도 영역(15% 이하)에서는 건조법(oven-dry method)에 의한 결과와 상당히 유사한 결과를 나타냈지만, 고농도 영역(15% 이상)에서는 초음파 신호의 투과력이 감소함에 따라 오차가 발생하여 측정 결과에 신뢰성을 부여하기 힘들었다. 이에 따라 초음파식 측정센서의 경우 실제 레디믹스트 콘크리트 플랜트에 적용하기 바람직하지 않은 것으로 나타났다.

2) 기전력과 유체의 전도도와의 관계를 이용하여 유체의 농도를 검출할 수 있는 유도 인덕턴스 방식의 회수수 농도 측정 센서를 개발하였으며, 실내 실험결과 측정 대상의 모든 농도(5~40%)에서 건조법과 큰 유사성 있는 결과를 나타냈다.

3) 유도 인덕턴스 방식의 센서를 실제 가동중인 레디믹스트 콘크리트 플랜트에 현장 적용성 평가를 수행하였으며, 회수수 탱크에서 실내 실험과 동일한 방식의 수중 펌프를 이용하여 측정한 결과 건조법에 의한 결과와 현저한 차이를 보였으며, 이는 탱크 내부에 설치한 수중펌프에서 센서부로 동일한 양과 유속의 슬러지수가 공급되지 않는 문제가 발생하였으며 원인 분석결과 슬러지수 사용량에 따라 탱크 내부의 수위가 변동되기 때문인 것으로 확인되었다.

4) 이러한 문제점을 하기 위해 레미콘 생산현장 배치 플랜트로 회수수를 이송하는 메인 배관에 분관을 설치하여 일정량을 샘플링하는 방식으로 변경하여 약 30일간의 측정된 결과 건조법에 의한 결과와 잘 일치하였으며, 오차는 모두 $\pm 5\%$ 이내로 나타났다.

References

- 1) Y. C. Choi, "Microwave Moisture Measurement of Fine Aggregate in RMC Industry", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 27, No. 1, pp. 63-69, 2012.
- 2) Franco Sandrolini, "Waste Wash Water Recycling in Ready-mixed Concrete Plants", Cement and Concrete Research, Vol 31, Issue 3, pp. 485-489, 2001.
- 3) Korean Standards Association, "KS F 4009 Ready-mixed Concrete", 2011.

- 4) G. C. Lee, "Investigation on the Recycling Water of Ready Mixed Concrete Solid Content Management Method", Journal of the Recycled Construction Resources Institute, Vol. 09, No.2, pp. 119-122, 2009.
- 5) Korea Concrete Institute, "Plant Equipments of Ready-mixed Concrete and Quality of Concrete", pp. 119-125, 2004.
- 6) K. J. Lee, "Property of Concrete by The Recycling Water of Ready Mixed Concrete Plant", KCI, pp. 67-68. 2010.
- 7) S. R. Woo, "An Experimental Study on the Reuse of Recycling Water of Ready Mixed Concrete Such as Concrete Water(1)-Part 1: The Mechanical Properties of Mortar with the Water Kinds and Sludge Content", KCI, Vol 13. No 1, pp. 379-382, 1993
- 8) S. R. Woo, "An Experimental Study on the Reuse of Recycling Water of Ready Mixed Concrete Such as Concrete Water(2)-Part 2 : The Mechanical Properties of Mortar with Mixing Proportion and Open Time of Recycling Water", KCI, Vol. 13. No. 1, pp .383-386, 1993.
- 9) N. Su, B. Miao and F. Liu, "Effect of Wash Water and underground Water on Properties of Concrete", Cement and Concrete Research 32, pp.777-782, 2002.
- 10) Japanese Industrial Standards Committee, "JIS A 5308 Ready-mixed Concrete", 2014.
- 11) J. Borger, R.L. Carrasquillo and D.W. Fowler, "Use of Recycled Wash Water and Returned Plastic Concrete in the Production of Fresh Concrete", Adv.Cem. Based Mater., pp. 267-274, 1994.