

콘크리트 리사이클링 기술의 최신 동향 - 유도가열 방식을 이용한 철근 콘크리트 부재의 해체 기술과 마이크로파 가열을 이용한 골재 회수 기술

Recent Progress in Concrete Recycling Technology -
Disintegration Technology of RC Members Using the Induction Heating and Aggregate Recovery Technology Using Microwave Heating



임명관*
Myung-Kwan Lim



최희섭**
Hee-Sup Choi



쯔지노 마사토***
Tsujino, Masato



키타카키 료마****
Kitagaki, Ryoma



노구치 타카후미*****
Noguchi, Takafumi

본 기사는 일본콘크리트공학회(JCI)의 연차논문집 제32권 (2010. 7) '유도가열 방식을 이용한 철근콘크리트 부재의 해체 기술 평가에 관한 연구'와 일본건축학회(AIJ)의 대회발표논문 A-1, P577 (2010) '유도가열방식을 이용한 기존 RC부재의 해체기술 개발', 일본 동경대학교 대학원 공학계 연구가 '제30회 심포지엄 -차세대 저에너지형 고성능 완전 리사이클 콘크리트 기술개발 (2008. 9)에서 발표된 '마이크로파를 이용한 골재 회수형 완전 리사이클 콘크리트 기술 개발', 일본 콘크리트 공학회(JCI)에서 발행하는 '콘크리트 공학 연차 논문집'의 제24권 1호(2002) 논문인 '골재회수형 리사이클 향상 콘크리트의 기초적 물성'의 원저자이자 본 연구에 참여 중인 필자가 지도교수인 노구치 타카후미(野口貴文) 교수의 허락 하에 수정·보안 및 번역한 것이다.

1. 머리말

현재 각 산업분야에서는 3R(Reduce, Reuse, Recycle)을 위해 분해성을 고려한 재료 설계가 중요시되고 있다. 이러한 재료 설계는 해체 후의 재이용 및 리사이클뿐만 아니라 제품 중에 수명이 다른 부품이 존재하는 경우 그 점검과 업그레이드를 용이하게 하기 위해 이미 많은 산업분야(특히, 전자 제품 분야)에 도입되어 있으며, 건축 설비 분야에서도 분해성은 중요한 설계

요소로서 자리매김 되어지고 있다.

건축재료 및 부재에 분해성이 고려되어 있지 않은 시공시스템의 구조물 해체 및 시멘트계 접합부의 분해에는 큰 에너지 사용이 요구되며, 해체 재료를 재이용 하는 경우 고성능화 된 복합재료를 분해하기 위해선 다시 큰 에너지가 소비되고 있는 실정이다. 또한 이런 고성능화된 복합재료의 경우 큰 에너지를 사용해도 가능한 원 재료에 가까운 상태로 분리하는 것이 어렵기 때문에 이러한 리사이클 재료에 대한 이용가치가 저하되고 있는 것이 현 시점이다.

그럼에도 불구하고 콘크리트 중의 대부분을 차지하는 골재의 리사이클은 더욱 중요하게 여겨지고 있다. 현재 일본에서는 재생골재에 대한 JIS규격이 제정되어 콘크리트용 골재로서 적용되고 있지만, 고품질의 재생골재를 제조하기 위해서는 소비에너지 증대, 부산미분 발생 및 환경오염 등의 문제가 발생한다. 이런 이유로 비교적 소비에너지가 적은 저품질 재생 골재를 생산

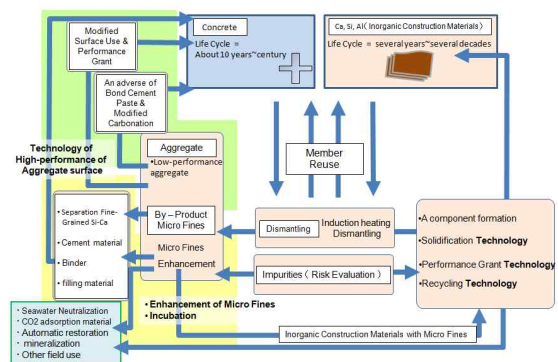


그림 1. 완전 리사이클 콘크리트 기술

* 정회원, 동경대학대학원 공학계 연구과 박사과정
limmk79@bme.arch.t.u-tokyo.ac.jp
** 정회원, 동경대학대학원 공학계 연구과 박사과정
*** 시미즈건설 기술연구소 생산기술센터 연구원 공학박사
**** 동경대학대학원 공학계 연구과 특임조교 공학박사
***** 동경대학대학원 공학계 연구과 준교수 공학박사

하고 이용을 유도하나 결국 콘크리트의 성능을 저하시키는 문제점으로 인해 재생골재의 사용증대에 걸림돌이 되고 있다. 이러한 현실에도 불구하고 골재의 완전 리사이클 기술 개발 등 자원순환형 기술의 실현이 건설업계에 요구되고 있는 것은 사용할 수 있는 천연분재가 급속하게 고갈되고 있기 때문이다.

현재 필자가 소속되어 있는 동경대학교(東京大学) 노구치 연구실에서는 앞에서 언급한 3R의 실현을 목표로 하여 ‘차세대 에너지 절약형 고성능 완전 리사이클 콘크리트 기술개발’이라는 주제로 다음과 같은 기술 개발 연구를 진행하고 있다.

- (1) 기존 콘크리트 구조물을 대상으로 하는 해체기술 및 공법 개발
- (2) 기존 구조물에서 발생하는 폐 콘크리트를 대상으로 하는 완전 리사이클 기술 개발
- (3) 신설 콘크리트 구조물에 도입하는 해체가 용이한 기술·공법 및 리사이클 기술 개발
- (4) CO₂ 배출량 및 폐기물 발생량을 최소화하기 위한 콘크리트 배합 개발
- (5) 시멘트계 건축재료의 완전 리사이클 기술 개발
- (6) 수세기에 걸쳐 발생하는 구조물의 환경부하 최소화 방책의 도출을 지원하는 시스템 개발
- (7) 모의부재 및 실구조물에 대한 해체기술·공법 및 리사이클 기술의 환경부하 저감 효과의 검토
- (8) 시멘트·콘크리트계 건축재료를 지속적으로 완전순환시키기 위한 가이드라인 구축

본 고에서는 이러한 연구의 일환으로써, 콘크리트 구조물의 해체 시 보다 적은 에너지를 사용하며, 선택적 가열을 통해 국부해체를 실시, 구조물의 재이용률을 높일 수 있는 ‘유도가열 방식을 이용한 철근 콘크리트 부재의 해체기술 개발’과 콘크리트 구조물의 해체 시 발생하는 재생골재를 천연골재에 가까운 상태로 회수가 가능하며, 콘크리트에 요구되는 강도 및 내구성능을 동시에 달성할 수 있는 ‘마이크로파 가열을 통한 골재 회수형 완전 리사이클 콘크리트 기술 개발’에 대해 소개하고자 한다.

2. 유도가열을 이용한 금속가열 기술

2.1 개요

기존 철근콘크리트 해체방식의 경우 대부분이 증기를 사용하는 것으로 상당한 에너지의 소비비가 요구되고 있다. 또한 발파 등의 해체 방식의 경우도 해체 공기 단축이라는 이점이 있지만, 발

파 시 분진에 의한 환경오염과 더불어 발파 후의 재처리 과정에서 다시 각종 폐기물과 재활용 자재의 분리에 소요되는 시간 및 높은 에너지소비 등의 크고 작은 문제점들이 지적되어 오고 있는 실정이다.

본 유도가열 기술은 소량의 전력을 수반하여 구조물의 선택적 가열을 실시, 국부해체(局部解体)를 실현하는 것으로, 수명이 다하지 않은 부재의 재이용률을 높이고, 해체된 구조물을 원재료의 재자원으로 이용 시 철근과 콘크리트를 간단히 분리하여 각각의 고품질 재료로 재활용률을 높일 수 있는 기술이다.

2.2 유도가열(induction heating)

유도가열은 도선(導線)에 교류전류가 흐르는 경우 그 주변에 강도가 변화하는 자력선이 발생한다. <그림 2>와 같이 그 주변에 전기를 통하는 물질(통상 금속을 칭함)을 두면, 이 변화하는 자력선에 영향을 받아 금속안에 와전류(eddy current)가 흐르게 된다. 통상 금속에는 전기저항성이 있기 때문에 금속에 전류가 흐르면 ‘전력 = 전류² × 저항’량의 줄(J, Joule)열이 발생해 금속이 가열되며, 이 현상을 유도가열이라고 한다.

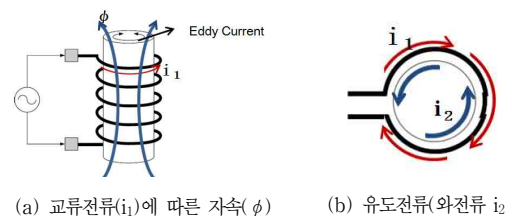
유도가열은 금속만을 가열 할 수 있으므로 가열 부분 이외의 온도 상승에 의한 위험성이 낮고, 열손실도 적다. 또한 시멘트계 물질은 약 300℃가 되면 내부에서 탈수가 생겨 공극률이 증가, 열수축에 의해서 강도가 저하하는 성질이 있다. 이러한 원리를 이용해 원하는 부위의 철근을 일정 거리 및 일정 출력으로 국부가열시켜 철근을 감싸고 있는 주변 콘크리트를 취약화시키는 것이 가능한 기술이다.

2.3 본 기술의 연구성과

2.3.1 철근의 온도상승특성 검토

<그림 3> 및 식(1)과 같이 소용돌이 전류라 불리는 와전류의 경우 피가열물의 표면에 가까울 수록 커지고, 내부로 멀어짐에 따라 지수 함수적으로 작아진다. 이것을 표면효과라고 한다.

이러한 특성을 이용하여 철근 표면의 온도상승특성을 검토하였다. 앞서 설명한 바와 같이 철근 표면의 목표온도(콘크리트 취약화 온도)를 300℃로 설정 하였으며, 각각 5종류의 철근을 이



(a) 교류전류(i_1)에 따른 자속(ϕ) (b) 유도전류(와전류 i_2)
그림 2. 유도가열 메커니즘²⁾

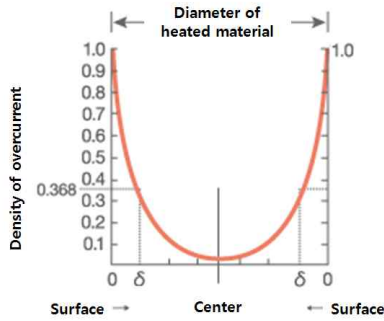


그림 3. 와주전류에 의한 표면 효과

용하여 가열을 실시하였고, 그 표면의 온도차를 열화상 카메라를 이용하여 측정한 값을 <그림 4>에 나타내었다.

본 실험의 결과, 가열 거리에 따른 차이는 다소 있었지만 출력량 6 kW로 약 1~3분 이내에 본 실험에서 목표로 한 300°C를 만족하는 결과를 나타내었고, 철근의 큐리온도(curie point) 이후로 안정적인 온도를 유지 하였다. 또한 <그림 5>와 같이 유도 가열에 따른 철근 표면 중심부의 국부가열 현상도 확인되었다.

$$\delta = 5.03 \sqrt{\rho / \mu f} \quad (1)$$

여기에서,

ρ : 금속의 고유저항($\mu\Omega - cm$)

강(鋼)의 경우, 상온에서 20, 1,000°C에서 128.

동(銅)의 경우, 상온에서 3, 450°C에서 8.

μ : 비투자율(比透磁率), 비자성체(非磁性)의 경우 1
자성체의 경우 자계(磁界)의 강성에 따라 변화,
강재(鋼材)의 가열에서는 20 ~ 1,000.

f : 주파수(Hz)

2.3.2 철근의 온도 상승 특성 검토

본 실험에서는 앞서 실시한 철근의 온도상승 특성 검토 결과를 토대로 유도가열에 따른 콘크리트 시험체 내부의 철근의 온

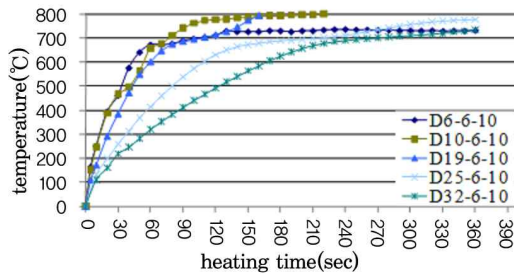


그림 4. 유도가열에 따른 철근표면의 온도특성

도상승특성 및 콘크리트 내부의 열전도 특성을 검토하기 위해 실험을 실시하였으며, 가열 전·후의 철근 부착강도 실험 이후 그 잔존강도를 계산하여 철근 콘크리트의 취약화 특성을 검토하였다<그림 5~8>.

실험 결과 열전대를 통해 철근의 표면이 가열되고, 이후 열전도에 의해 콘크리트 표면부까지 온도가 상승되는 것이 확인 되었으며, 열화상 카메라 측정에 의해 콘크리트 유·무에 관계없이 코일에 접한 부분의 철근 표면만을 선택적 가열하는 것이 가능했다. 또한 단시간 내 급속한 온도상승으로 인해 모든 시험체에서 1~3분 이내 철근 표면부터 콘크리트 표면까지 균열을 발생시키는 것을 확인 하였다.

이후, <그림 9>에 나타난 바와 같이 가열 전 시험체와 가열 후 시험체의 철근 부착강도 실험에 따른 잔존 강도값을 계산하여 비교한 결과, 가열 전에 비해 약 30% 정도 부착 강도값을 저하시킨 것으로 나타났다. 또한 <그림 8>에 나타난 부착강도 실험 이후, 가열된 철근 표면부와 그 주변의 콘크리트가 완벽히 분리 되는 것을 확인할 수 있었다. 본 실험의 경우 6 kW의 전

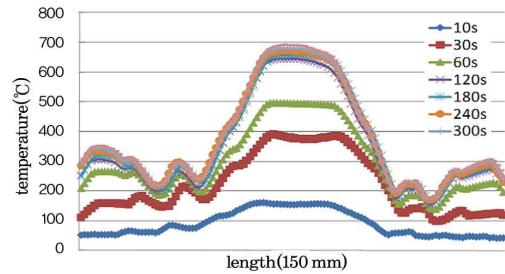


그림 5. 철근 표면의 온도 분포

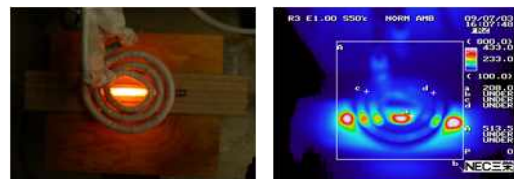


그림 6. 철근 가열 실험 및 열화상 측정화면

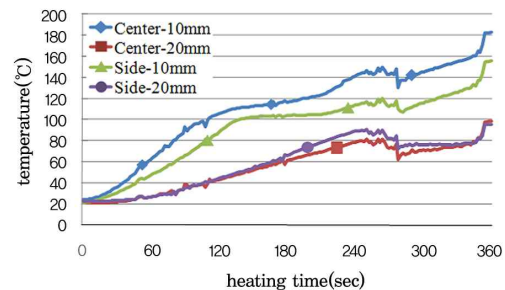


그림 7. 유도가열에 따른 철근콘크리트 온도 특성



(a) 철근콘크리트 가열 (b) 균열발생 (c) 균열발생 (d) 철근 부착강도 실험 (e) 부착강도 실험 후

그림 8. 철근 콘크리트 가열 실험 및 부착강도 실험

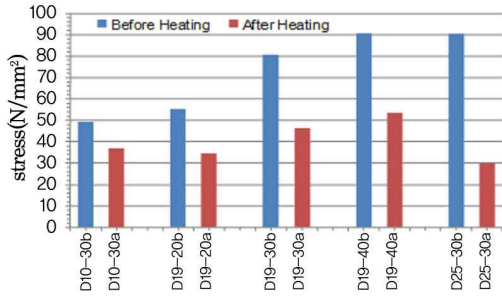


그림 9. 가열 전·후의 철근의 부착강도

표 1. 콘크리트 배합비

설계기준강도 (N/mm ²)	슬럼프 (mm)	공기량 (%)	W/C (%)	S/a (%)
24	120	3	50	45
단위결합재량(kg/m ³)				혼화제 (%)
물 W	시멘트 C	잔골재 S	굵은골재 G	
180	360	799	1,003	(0.3%)

력을 사용하여 실험을 실시하였지만 이후 유도가열의 전력량 조절에 따라 보다 효율적으로 콘크리트를 분리하는 것이 가능할 것으로 기대된다.

2.3.3 본 기술의 기대 효과

1) 에너지 절약

피가열물(被加熱物), 그 자체를 가열하므로 열손실이 적고, 효율 높은 가열이 가능하다. 또한 피가열물의 단위면적에 공급되는 단위시간당의 에너지가 크기 때문에 고속·고온 가열이 가능하다.

2) 급속 가열

급속 가열로 정도가 높은 온도 관리가 가능하고, 산화물(酸化物)의 발생이 지극히 적으며, 고품질을 유지할 수 있다.

3) 제조 프로세스 개선

유도가열의 장치가 컴팩트하여 자동화가 용이 하기 때문에 제조 프로세스의 개선으로 연결된다.

3. 마이크로파를 이용한 골재회수형 완전 리사이클 기술

3.1 개요

마이크로파 가열을 이용한 골재회수형 완전 리사이클 콘크리트 기술은 <그림 10>과 같은 프로세스로 나타낼 수 있다. 즉, 굵은 골재의 표면에 높은 유전율(誘電率)을 가지는 재료를 혼합한 표면개질 처리재를 도포한다. 이후 구조물 해체 시 발생하는 유전재료가 도포된 재생골재의 계면부분을 마이크로파에 의해서 선택적으로 가열 및 취약화 시켜 저에너지로 고품질 재생골재의 효과적 회수가 가능하다³⁾.

따라서 본 기술은 저 에너지를 통한 고품질 재생골재의 생산성 향상과 더불어 CO₂ 배출 감소, 환경부하 저감 등의 효과로 인해 에너지 단가를 큰 폭으로 저감시킬 수 있어 골재의 완전 리사이클화⁴⁾ 실현과 더불어 마이크로파 반응 프로세스 기술의 실용화가 가능할 것으로 기대된다.

3.2 마이크로파(microwave) 가열

마이크로파 가열은 <그림 11>과 같이 ‘유전가열’의 원리에 의해 피가열물 자신(유전체)이 발열체가 되는 ‘내부 가열 방식’으로 이 유전가열 방식의 원리는 마이크로파에 의해 피가열물을 구성하고 있는 분자가 전파의 힘을 받아 전기적으로 변위·분극되며, 마이크로파에 의해 격렬히 진동하게 된다(2,450 MHz의 경우, 24억 5천만회/sec). 이때 각 분자간에 마찰열이 발생해

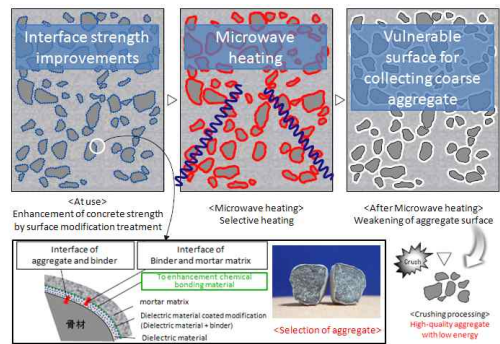


그림 10. 마이크로파를 이용한 골재 회수 시스템

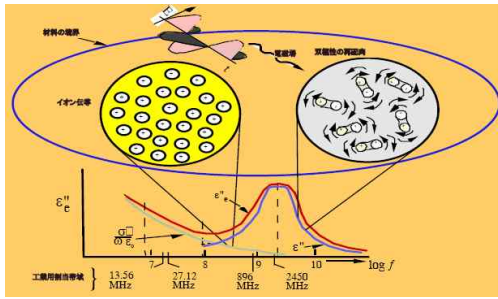


그림 11. 마이크로 가열 방식

유전체 전체가 발열 및 온도가 상승하게 되며, 이러한 원리를 이용하여 ‘마이크로파 가열’의 유전모델을 설정하였다.

3.3 본 기술의 연구 성과

3.3.1 CO₂ 배출량 평가를 통한 소비 에너지 특성

마이크로파 가열을 통한 콘크리트 리사이클의 최대 특징은 저에너지로 고품질의 재생골재를 제조할 수 있는 것이다.

<그림 12>에서는 CO₂ 배출량을 측정지표로 산정한 후, 각 고품질 재생골재의 제조법을 비교하였다. 그러나 기존의 재생골재 제조공법인 가열법과 파·분쇄법은 실제 수준의 데이터에 근거하고 있지만 마이크로파 가열법은 실험실 수준의 데이터를 기초로 하고 있음에도 불구하고 비교적 정량적인 평가결과를 나타내었다고 판단된다.

본 실험의 결과, 마이크로파 가열을 이용한 경우 <그림 12>에서 보는 바와 같이 실험에서 사용된 전자렌지의 정격 소비 출력(2.8kWwh)이며, 이때 정격 출력을 바탕으로 산출한 결과에 의하면 배출되는 CO₂량은 전체적으로 마이크로파 가열법이 일반 가열법과 비교해 압도적으로 낮은 CO₂ 배출량 수치를 나타내고 있다. 또한 파·분쇄법과 비교한 경우에도 대체로 CO₂ 배출량이 적었으며, 마이크로파 가열시간이 가장 긴 120초의 경우 파·분쇄법과 동일한 정도의 CO₂ 배출량 결과를 나타내었다.

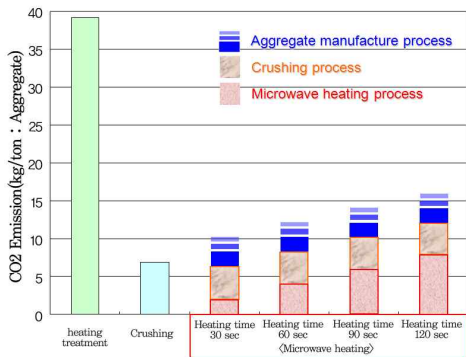


그림 12. 페콘크리트 1톤 처리 시 방출되는 CO₂량

3.3.2 유전재료(誘電材料)로서 산화철의 적용성

유전재료의 가장 중요한 특성은 마이크로파 가열에 의해서 모르타르가 취약화되는 300℃까지 짧은 시간에 도달하는 것이다. 따라서 본 연구에서는 유전재료로서 산화철(II) FeO를 사용하였으며, 산화철(II) FeO의 성분은 <표 2>와 같다. FeO는 철을 공기 중에서 575℃ 이상으로 가열했을 때 철 표면에 생성되는 것으로, 흑색을 나타낸다. 이렇게 생성되는 FeO를 일반적으로 흑장(黑錆)이라고 하며, 이형철근의 표면에서 볼 수 있다. <그림 13>에서와 같이 마이크로파를 통한 산화철의 온도상승 특성인 서모그라피 결과를 얻을 수 있었다. 또한 <그림 14>와 같이 유전재료로서 산화철의 타당성을 검토하기 위해 마이크로파 가열 시 전로(轉炉)OG세팅더스트, 스틸파우더, 동(銅)슬러그와의 온도상승 특성에 대한 각 유전재료의 가열시간과 온도 관계를 비교·분석하였다. 그 결과 다른 유전재료에 비해 산화철이 초기 온도상승이 가장 높았으며, 이후 비교적 안정적인 온도 상승 및 온도제어가 가능한 것을 확인하였다.

3.3.3 본 기술을 적용한 콘크리트 성능

본 기술을 적용한 콘크리트의 압축강도 시험결과는 <그림 15>에 나타내었다. 여기서 N은 표면개질 처리를 하지 않은 시험체이며, SP70은 굵은 골재와 모르타르 매트릭스와의 부착력 향상을 위한 재료로서 실리카 폼 30%, 부산미분 70%의 비율로 산화철이 혼합된 분체를 굵은 골재 표면에 부착시킨 시험체이다. SP80(실리카 폼 20%, 부산미분 80%) 및 SP90(실리카 폼 10%, 부산미분 90%)의 압축강도는 N에 비해 큰 폭으로 상승하고 있는

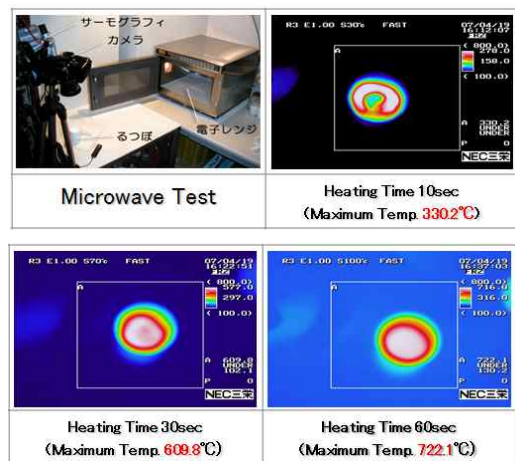


그림 13. 마이크로파에 의한 산화철의 서모그라피

표 2. 산화철의 화학적 구성 성분(%)

Fe	O	Si	P	Mn	Cu	Zn
75.79	20.86	0.47	1.15	0.66	0.66	0.40

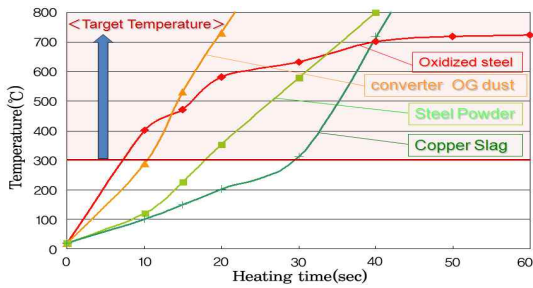


그림 14. 유전재료의 온도상승특성

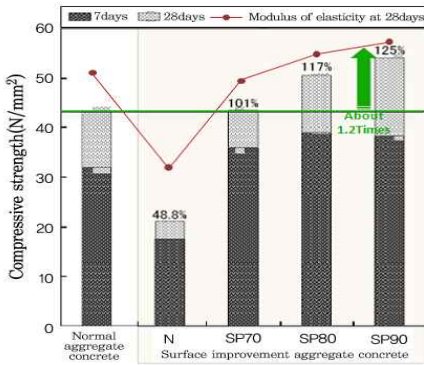


그림 15. 압축강도

것을 알 수 있다. 이와 같이 적절한 분체를 굽은 골재 표면에 부착시키면 동일배합의 N에 비해 약 1.2배 정도 강도향상이 가능하며, 이는 화학적 부착하중(포졸란 반응)의 증대로 추정된다.

3.3.4 골재의 회수 성능

SP80 및 SP90의 콘크리트에 대해 마이크로파 가열을 이용한 골재 회수 성능의 검토를 실시하였으며, <그림 16>에서는 굽은골재 회수율을 나타내었다.

그 결과 마이크로파 가열을 실시한 SP80 및 SP90 시험체의 원재료 항목을 살펴보면, 페이스트 및 잔골재가 약 7% 정도로 나타나, 상당히 고품질인 굽은 골재의 회수가능성을 확인하였다.

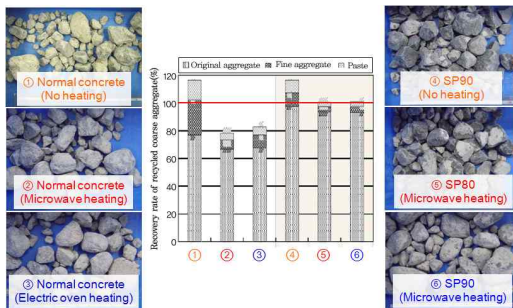


그림 16. 재생골재 회수율

4. 맺음말

유도가열 방식을 이용한 철근콘크리트 구조물의 해체기술은 기존의 해체 방식과는 달리 작은 에너지를 이용해 원하는 부위의 철근 콘크리트 구조물을 단시간에 분리하는 기술이다. 에너지 절감 및 해체 시간을 최소화함으로 CO₂ 발생량을 저감시켜 환경부하 개선을 도모하고, 부재로서의 재이용 및 재자원화에 있어서 불필요한 작업을 줄임으로 고품질의 제품 생산을 가능케 되어, 현장 적용성에도 기대가 크다. 또한 현재 동경대학교 노구치 연구실에서는 PC부재의 접합부를 대상으로 유도가열에 반응하는 도전성 저항체를 혼입하는 것으로 기존 물성을 유지하면서 해체 시 유도가열에 반응하는 기술에 대해서도 현재 연구를 진행해 나가고 있다. 이러한 연구를 토대로 『에너지 절약형 리유즈, 리사이클 해체기술 개발』이 가능할 것으로 기대된다.

마이크로파 가열을 이용한 골재 회수형 완전 리사이클 콘크리트 제안기술은 골재와 시멘트 매트릭스간의 물리·화학적 결합력 향상을 가능하게 하는 개질재료를 골재 표면에 부착시켜 콘크리트의 취약부인 천이대 개선 및 콘크리트의 내구성 향상을 가능하게 한다. 또한 골재 측에 더욱 높은 유전율을 가지는 재료로 골재를 미리 코팅하고, 마이크로파를 통해 선택적으로 가열·취약화 시켜 저에너지로 고품질 골재를 회수할 수 있는 골재의 완전 리사이클화 가능성이 한층 높아졌다고 필자는 생각한다. 현재, 동경대학 노구치 교수 연구실에서는 본 기술의 연구·개발을 지속적으로 진행하고 있으며, 이러한 연구를 토대로 하여 향후, 콘크리트 강도·골재회수 성능 증대 및 에너지 소비·골재 품질 향상의 상호교환이 가능할 것이다. 또한 이와 더불어 최종적으로 구조물의 연명화(延命化) 및 환경 부하 효과가 부합된 『에너지 절약형 고성능 완전 리사이클 콘크리트 기술 개발』이 가능할 것으로 판단된다. □

참고문헌

- 李俊弦·太田福男：電磁誘導加熱鉄筋によるかぶりコンクリートのひび割れ発生応力について，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1分冊，1997，pp. 133～134.
- 安宰徹：建築材料および部品の易分解性を考慮したセメント系接合技術の開発，東京大学学位論文，2010. 3.
- 野口貴文,辻埜真人,北垣亮馬：特集:再生・次世代省エネ型高性能完全リサイクルコンクリート技術の開発,東京大学大学院工学系・情報理工学系研究科 第30回 記者会見, No. 2, 2008, 9.
- 田村雅紀,野口貴文,橋高義典：骨材回収型リサイクル指向コンクリートの基礎的物性,コンクリート工学年次論文集, Vol. 24, No. 1, 2002.

담당 편집위원 : 양인환(군산대학교) ihyang@kunsan.ac.kr