

# 순환굵은골재 치환율에 따른 콘크리트의 압축파괴 및 음향방출특성

## The Effect of Recycled Coarse Aggregates Replacement Level on Localized Fracture and Acoustic Emission of Concrete in Compression

김 윤 수\*      윤 현 도\*\*      유 영 찬\*\*\*  
Kim, Yun-Su      Yun, Hyun-Do      You, Young-Chan

### ABSTRACT

When concrete is subjected to uniaxial compression, the failure process is normally initiated from a localized zone. The localization of failure governs structural behaviors of concrete. In this paper, the compressive strength and failure behavior of recycled coarse aggregate concrete with different replacement level of recycled coarse aggregates are investigated using acoustic emission(AE). AE characteristics of concrete were investigated during the entire loading period. For these purpose, four recycled coarse aggregate replacement level (i.e 0%, 30%, 60% and 100%) were considered in this paper. Result from this study show AE signal, AE method can apply to investigate a compressive failure mode according to recycled coarse replacement level.

### 1. 서 론

현대 사회는 경제성장과 이에 따른 국민생활수준의 향상으로 인해 거주자의 생활환경 개선에 대한 요구가 증대되고 있다. 이에 따라 국내에서도 도시의 재개발이 이루어지고 있어 건설폐기물의 양이 급격히 증가하고 있다. 특히 폐콘크리트와 같은 건설 폐기물은 매년 막대한 양이 발생하고 있지만, 현재 가용 매립지의 부족으로 인한 불법 매립 및 소각 등으로 인해 환경오염에 심각한 문제를 유발하고 있다. 이러한 상황에서 폐콘크리트의 재활용은 환경오염에 원인이 되고 있는 불법 매립을 방지할 수 있으며, 부족한 골재 자원 절약이라는 면에서 많은 효과가 기대된다. 이에 국내에서도 정부의 건설폐기물 재활용을 권장하고 있어, 순환골재의 사용은 더욱 증가할 것으로 판단된다. 하지만 순환골재를 사용한 콘크리트는 순환골재의 낮은 비중특성과 높은 흡수율로 인해 천연골재를 사용한 콘크리트와 상이한 파괴 특성<sup>1)</sup>을 보이지만, 현재 국내에서는 순환골재를 사용한 콘크리트의 배합 및 특성에 관한 연구만이 활발히 진행되고 있어, 순환골재를 사용한 콘크리트부재 내부의 손상진전에 따른 파괴메커니즘에 관한 연구가 특히 필요한 실정이다. 한편 고체내부의 균열 발생시 발생하는 탄성파(Acoustic Emission, AE)를 이용하는 AE기법은 하중 작용시 콘크리트부재 내부의 손상진전에 따라 발생하는 AE 신호를 상세하게 분석함으로써 구조부재 내부의 미세적 변화를 실시간으로 계측이 가능하다는 장점이 있어, 현재 국내에서도 모르타르 및 콘크리트 파괴거동에 관한 연구<sup>2)</sup>가 활발히 이루어지고 있다. 이에 본 연구에서는 AE기법을 사용하여 순환굵은골재 대체에 따른 콘크리트 공시체의 압축파괴특성을 천연굵은골재를 사용한 콘크리트와 비교·분석함으로써 순환골재콘크리트 내부의 손상메커니즘을 비파괴적으로 평가하고자 한다.

### 2. 압축을 받는 콘크리트의 파괴메커니즘

Thomas 등<sup>3)</sup>의 연구결과에 따르면 콘크리트는 내부의 골재 및 모르타르 등의 요소 사이에 응력이 재분배되어 미세균열이 점진적으로 진전되며, 결과적으로 이러한 응력이 재료 내부의 페이스트와 골재 사이의 계면파괴인 부착균열 또는 골재와 골재 사이의 모르타르 균열로 진전되어 최종 파괴되는 것으로 고되고 있다. 이러한 콘크리트는 중심축력 작용시 미세균열 진전 및 파괴특성에 따라 표 1과 같이 4단계로 분류할 수 있다.

\* 정회원, 충남대학교 건축공학과 석사과정  
\*\*\* 정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원, 공학박사

\*\* 정회원, 충남대학교 건축공학과 교수, 공학박사

표 1 콘크리트의 압축파괴단계

Stage	$a/f_{cu}$ (%)	Damage
I	0~30	응력-변형도 관계에 거의 영향을 미치지 않는 미세균열 발생
II	30~40	시멘트 페이스트와 골재 사이의 인장 및 전단으로 인한 부착균열 발생
III	50~80	부착균열 사이에 국부적인 모르타르균열 발생
IV	80~100	균열 및 횡변형량의 급격한 증가

표 2 콘크리트의 배합조건

시험체명	순환골은골재 치환율 (%)	$f_{ck}$ (MPa)	W/C (%)	S/a (%)	단위중량(kg/cm <sup>3</sup> )				
					W	C	S	NG	RG
RA0	0	27	43.6	46	132	392	823	960	0
RA30	30	27	43.6	46	132	392	823	672	267
RA60	60	27	43.6	46	132	392	823	394	533
RA100	100	27	43.6	46	132	392	825	0	888

\*RA0 : Recycled coarse Aggregate      0 : Replacement level

표 3 사용골재의 물리적 성질

사용골재	입경 (mm)	절건밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	흡수율 (%)	단위용적 중량(g/ℓ)
천연골은골재	25	2.61	0.69	1.509
순환골은골재	20	2.49	2.99	1.557

표 4 콘크리트의 강도특성

시험체명	압축강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)
RA0	36.97	24.16
RA30	33.81	22.07
RA60	32.35	20.52
RA100	29.17	20.83

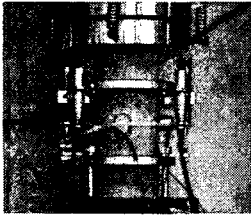


그림 1 시험체 설치 및 측정상황

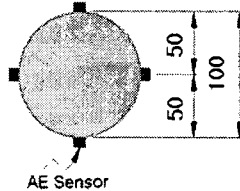


그림 2. AE센서 위치

### 3. 실험

#### 3.1 시험체 계획 및 제작

본 연구에서는 순환골은골재사용한 콘크리트의 압축파괴시 손상진전에 따른 AE신호특성을 규명하기 위하여 표 2에 나타난 바와 같이 배합계획 하였다. 천연골재만을 사용한 RA0 시험체를 기준시험체로 하여 순환골은골재 대체율 30%인 RA30 시험체, 60% 대체한 RA60 및 100% 대체한 RA100의 총 4개의 표준압축공시체를 제작하였다.

#### 3.2 사용재료

본 연구에서 사용된 시멘트는 KS L 규정에 적합한 1종 보통 포틀랜드 시멘트(비중 3.15, 분말도 3.63cm<sup>3</sup>/g)를 사용하였고, 실험에 사용된 순환골은골재의 경우 골재품질의 하한치(흡수율 3.0%, 절건밀도 2.50g/mm<sup>3</sup>)를 만족하는 골재를 반복시험을 통해 선정하였으며, 천연골은골재 및 순환골은골재의 물리적 성질은 표 3에 나타난 바와 같다.

#### 3.3 시험체 설치 및 AE 측정방법

그림 1에 나타난 바와 같이 2,000kN 용량의 UTM을 사용하여 중심축력을 가력하였으며, 압축시 UTM과의 부착마찰에 의한 구속을 고려하여 중앙부 100mm 구간을 축변형도 측정범위로 하였다. 또한 가력시 콘크리트 공시체의 손상진전에 따른 AE를 신호를 측정하기 위하여 시험체 중앙부에 그림 2와 같이 AE센서 4개를 설치하여 실험 종료시까지 AE신호를 측정하였다.

### 4. 실험결과 및 분석

#### 4.1 강도특성

순환골은골재 치환율에 따른 압축강도 및 탄성계수를 표 4에 각각 비교하여 나타내었다. 표에 나타난 바와 같이 최대압축강도는 RA0(36.97MPa)>RA30(33.81MPa)>RA60(32.35MPa)>RA100(29.17MPa) 순으로 나타났으며, 탄성계수의 경우에도 최대압축강도와 비슷한 양상으로 나타나, 순환골은골재 치환율이 높아짐에 따라 낮아지는 경향을 보였다. 이는 순환골은골재 표면에 붙어 있는 부착모르타르로 인해 골재의 비중이 감소하여 초기강성 및 최대압축강도에 영향을 미친 것으로 판단된다.

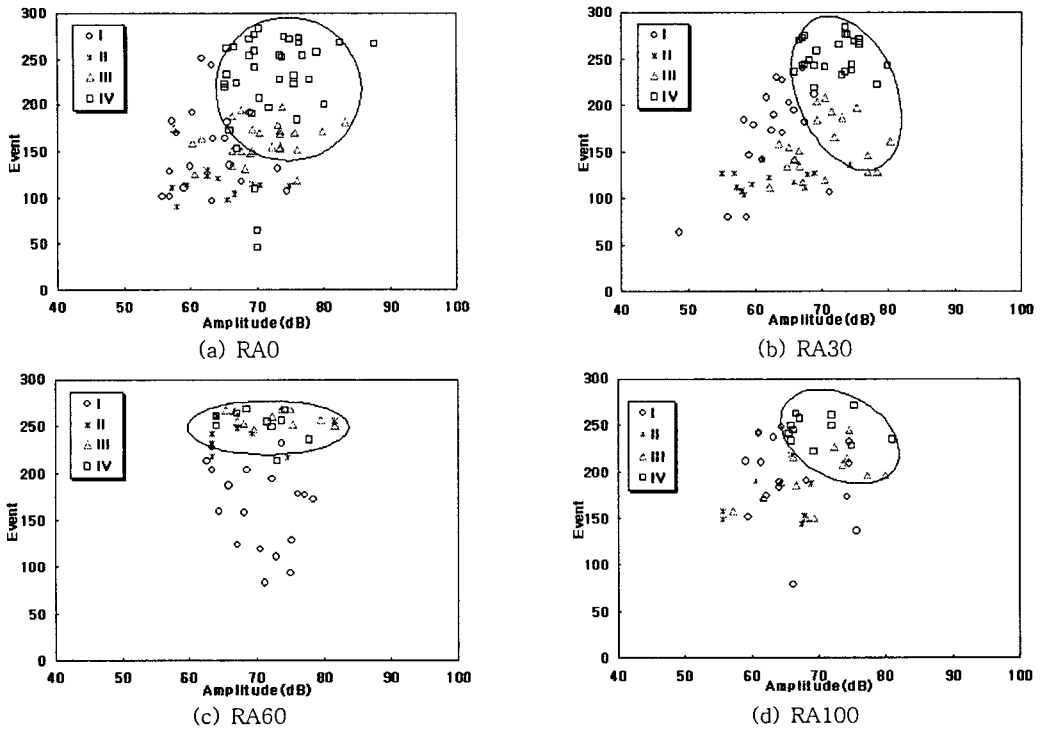


그림 4 응력단계에 따른 진폭-사상수 관계

#### 4.2 AE 신호특성

그림 4는 응력수준이 증가함에 따라 각각의 응력단계에서 나타나는 사상수(Event)와 진폭(Amplitude)의 관계를 비교하여 나타낸 것이다. 그림 4(a)에 나타난 바와 같이 RA0시험체의 경우 초기응력수준인 I, II 단계에서는 55~65dB 진폭범위를 갖는 사상수가 89~200개로 나타났으며, 내부의 균열이 진전되어 최종파괴에 이르는 III, IV 단계에서는 65~80dB의 진폭범위의 사상수가 111~283개로 나타나, I, II 단계에 비해 상대적으로 높은 진폭범위를 갖는 사상수가 다수 나타났다. 또한 그림 4(b)와 (c)에 나타난 RA30시험체 및 RA100시험체 RA0시험체와 비슷한 양상으로 I, II 단계에서는 50~65dB와 55~65dB의 진폭범위를 갖는 사상수가 80~239개와 79~248개로 나타났으며, 최종파괴에 이르는 III, IV 단계에서는 70~80dB와 65~80dB의 진폭범위를 갖는 사상수가 128~283개와 149~271개로 나타났다. 반면 그림 4(c)에 나타난 RA60시험체의 경우 다른 시험체와 비슷한 양상으로 응력수준이 증가함에 따라 사상수는 I, II 단계에 비해 III, IV 단계에서 발생하는 사상수는 증가하였지만, 진폭범위의 변화는 거의 나타내지 않는 상이한 특성을 보였다. 또한 최종파괴시의 누적사상수는 천연쿰은골재만을 사용한 RA0시험체에서 16670개로 가장 많이 나타났으며, 순환쿰은골재를 사용한 시험체에서는 상대적으로 적은 14663개, 10123개, 10567개의 사상수를 각각 나타내었다. 이는 천연쿰은골재를 사용한 시험체의 경우 미세균열의 진전으로 인해 작용되는 압축응력의 재분배가 적절히 일어나는 반면, 순환쿰은골재를 사용한 시험체의 경우 골재 표면에 붙어있는 부차모르터의 영향으로 인해 압축응력을 고르게 분산시키지 못하였기 때문인 것으로 판단된다.

그림 5에서는 응력단계에 따른 에너지와 지속시간의 관계를 각각 비교하여 나타내었다. 그림 5(a)에 나타난 RA0시험체의 경우 I, II, III 단계까지 100,000~3,500,000eu보다 낮은 에너지를 가지며 3ms 이하의 지속시간을 갖는 범위에 AE 신호가 다수 측정되었으나, 최종파괴에 이르는 IV 단계에서는 에너지가 350,000~11,000,000eu의 범위로 급격히 증가하였고, 특히 9ms의 지속시간범위에서도 10,000,000eu 이상의 에너지를 갖는 신호가 나타났다. 그림 (b)에 나타난 RA30시험체도 RA0시험체와 비슷한 양상을 가지며 IV 단계에서 에너지가 급격히 증가하였지만, 최종파괴시 에너지는 850,000eu로 RA0시험체에 비해 비교적 낮은 값을 나타내었다. 그림 5(c)에 나타난 RA60시험체의 경우 RA0시험체와는 상이한 양상을 보이며 I, II, III 단계에서 200,000~720,000eu의 범위의 비교적 높은 에너지 범위를 나타내었으며, 최종파괴단계인

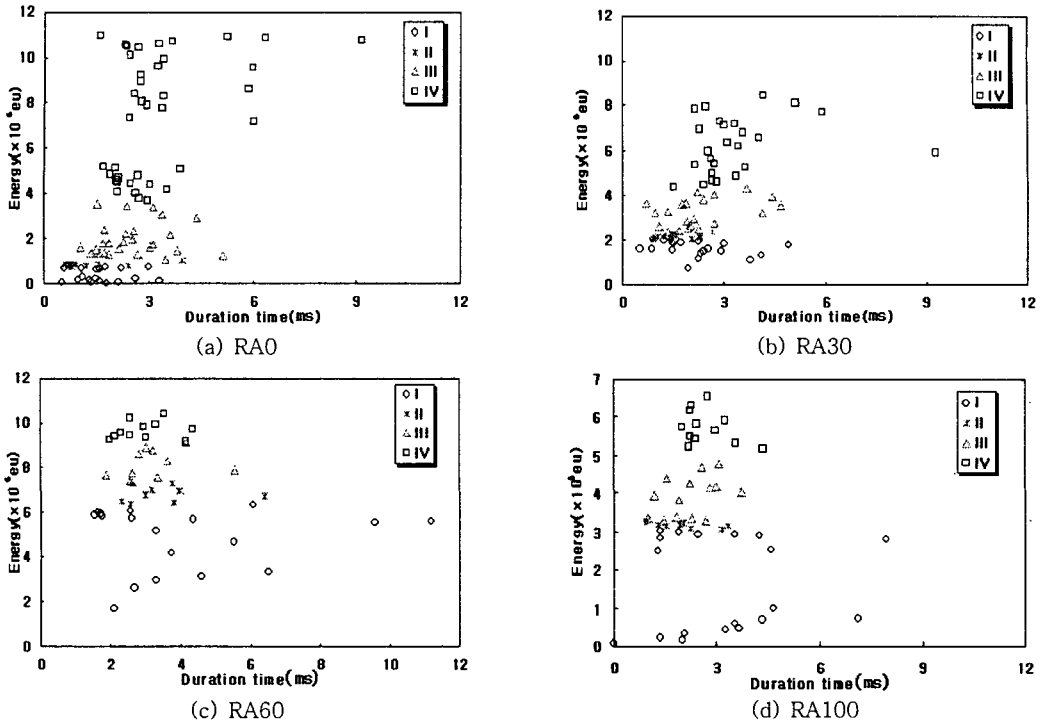


그림 5. 응력단계에 따른 에너지-지속시간 관계

IV단계에서 에너지가 10,000,000eu의 범위로 크게 증가하였지만, 최종파괴단계에서 RA0시험체에 비해 상대적으로 낮은 지속시간을 나타내었다. 또한 그림 5(d)에 나타난 RA100시험체의 경우 RA60시험체와 비슷한 양상으로 초기 RA0시험체에 비해 비교적 높은 에너지를 나타냈으나, III, IV단계에서도 3ms의 지속시간에서도 1,990~4,300eu범위의 에너지가 나타나 RA0시험체와는 상이한 파괴특성을 보였다. 이는 천연굵은골재를 사용한 시험체의 경우 작용되는 응력의 재분배로 미세균열이 진전되면서 점차적으로 에너지와 지속시간이 증가한 반면, 순환굵은골재를 사용한 시험체의 경우 골재표면의 부착모르터로 인해 골재와 시멘트페이스트 사이의 부착균열이 천연굵은골재에 비해 더 크게 발생하게 되어 초기응력단계에서 높은 범위의 에너지와 지속시간이 나타난 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

- 1) 순환굵은골재 사용시 골재 표면에 붙어있는 부착모르터의 영향으로 인해 대체율이 높아짐에 따라 초기강성 및 최대압축강도가 낮아지는 특성을 보여, 순환골재를 사용한 콘크리트의 압축강도가 목표강도에 미치지 못하는 것으로 판단된다.
- 2) 순환굵은골재를 사용한 시험체의 AE신호특성을 천연굵은골재를 사용한 시험체와 비교·분석한 결과 순환골재 사용시에는 각각의 응력단계에서 나타나는 사상수, 에너지 및 지속시간들이 천연골재와는 비해 상이한 특성을 보여 작용되는 응력을 적절히 분배하지 못하는 것으로 판단되며, 각 하중단계별로 이러한 AE 신호특성을 근거로 순환굵은골재를 적용한 부재에의 AE 기법 적용 및 내부의 손상메카니즘에 대한 규명이 가능할 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

1. 김부한 등, (1998), "건설폐기물 및 재생골재 콘크리트", 한국콘크리트 학회지, 제10권6호 p.52~p.60.
2. A.K. Maji, S.P. Shah(1988). "Process Zone and Acoustic Emission Measurement in Concrete", Experimental Mechanics
3. Thomas T. C. Hsu, F. O. Slate, G. M. Sturman, and George Winter(1963). "Micro-cracking of Plain Concrete and the Shape of the Stress-Strain Curve", ACI Journal, Proceedings, Vol. 60, No. 2, pp.209-224.