

음향방출기법을 이용한 순환골재 콘크리트의 압축파괴 기구의 정량화

Quantification of Localized Fracture Mechanism of Recycled Aggregate Concrete in Compression using Acoustic Emission Technique

김 선 우*
Kim, Sun-Woo

윤 현 도**
Yun, Hyun-Do

김 윤 수***
Kim, Yun-Su

Abstract

Reuse of recycled aggregate from demolished concrete structure is beneficial and necessary from the viewpoint of environmental preservation and effective utilization of resources. The most important mechanical properties of recycled aggregate concrete (RAC) are the compressive strength, the tensile and the flexural strengths, the bond strength and the elastic modulus of such concrete. In particular, the stress-strain relation and fracture process of RAC in compression is especially important in theoretical and numerical analysis as well as engineering design of RAC structures. In this paper, to clarify the characteristics of fracture process in RAC, acoustic emission(AE) method is applied to detect micro-cracking in concrete under compression. From AE parameters, it is found that cracking and fracture behaviors in recycled aggregate concrete fairly differ from that of normal and recycled sand concrete.

요 지

폐콘크리트로부터 생산된 순환골재의 사용은 환경보존과 자원의 재활용 관점에서 매우 유용하며, 순환골재 콘크리트에서 압축, 인장, 휨 및 부착강도, 탄성계수 등이 중요한 기계적 특성요소로 작용하게 된다. 특히 압축을 받는 순환골재 콘크리트의 응력-변형을 관계 및 파괴진전 양상 규명은 순환골재 콘크리트를 사용한 구조물 설계 및 수치해석 등 이론적 연구에서도 매우 중요한 의미를 가진다. 따라서 본 연구에서는 순환골재 콘크리트의 파괴진전특성을 규명하기 위하여 압축하중을 받는 콘크리트의 미세균열 등 손상특성을 검출하기 위하여 AE 기법을 사용하였다. 압축거동특성 및 AE 신호특성을 분석한 결과, 순환골재 콘크리트의 균열 및 파괴거동은 천연 및 순환골재를 사용한 콘크리트와 상이한 것으로 나타났다.

Keywords : Recycled aggregate concrete, Compression, Fracture process, Acoustic emission

핵심 용어 : 순환골재 콘크리트, 압축, 파괴진행, 음향방출

* 학생회원, 충남대학교 건축공학과 박사과정

** 정회원, 충남대학교 건축공학과 교수, 공학박사, 교신저자

*** 충남대학교 건축공학과 석사과정

E-mail : wiseroad@cnu.ac.kr 042-821-5622

•본 논문에 대한 토의를 2007년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 2008년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

국내 건설 산업의 지속적인 성장과 더불어 최근 재건축 및 재개발사업의 활성화 등으로 건설폐기물이 급격히 증가하는 추세에 있으며, 이러한 추세는 다양한 사회적 요구와 삶의 질 향상에 대한 욕구가 커짐에 따라 가속될 것으로 예상된다. 환경부 발표에 의하면 하루 평균 약 10만 톤 이상의 건설폐기물이 발생하고 있으며, 지금까지는 주로 매립에 의존하여 처리하고 있으나, 가용매립지의 부족과 막대한 처리비용으로 인해 불법 매립, 투기 및 소각되는 등 환경오염에 심각한 문제를 유발하고 있다. 또한 최근 판교 및 파주 등 많은 신도시개발 등으로 인해 천연골재의 수요는 지속적으로 증가할 것으로 예상되며, 이에 필요한 천연골재의 채취로 인해 연간 여의도 면적의 103배에 달하는 산림과 자연환경이 파괴되고 있어 건설폐기물의 재자원화에 대한 관심이 고조되고 있다. 이에 2004년 10월 환경부가 「건설폐기물의 재활용 촉진에 관한 법률」을 제정·공포함에 따라 건설시장에서의 순환골재 사용은 현재에 비해 지속적으로 증가할 것으로 판단되나, 국내에서는 순환골재를 사용한 콘크리트의 배합 및 특성에 관한 연구만이 활발히 진행되고 있다. 또한 콘크리트용 순환 골재는 일본⁽³⁾에서도 안전성 등을 고려해 거의 천연골재 기준에 준하도록 하고 있으나, 순환골재의 사용을 적극적으로 유도하기 위해 골재의 품질에 관계없이 압축강도를 동일하게 하여 구조물에 적용시 소정의 성능을 발휘하도록 하고자 하는 연구가 이루어지고 있다. 국내에서는 2005년 8월 개정된 순환골재 콘크리트 품질기준에 따르면 콘크리트용 순환골재의 경우 설계기준강도 21~27N/mm²에 한해 기둥, 보, 슬래브, 내력벽, 교량하부공, 옹벽, 교각, 교대, 터널 라이닝공 등에 사용되고 있으며, 21N/mm² 미만인 경우 콘크리트 블록, 도로 구조물 기초, 측구, 중력식 옹벽, 강도가 요구되지 않는 채움 콘크리트, 건축물의 비구조체 콘크리트 등에 적용하도

록 규정되어 있다. 그러나 순환골재의 경우에도 천연골재에 비해 높은 흡수율 및 낮은 비중 특성을 지니고 있어 천연골재 콘크리트와 상이한 파괴특성을 보이고, 기존 연구에 따른 단순한 재료특성 및 강도특성에 관한 결과만으로는 복합적인 응력상태에 놓여지게 되는 구조부재의 거동을 예측하기에 부족한 실정이며, 또한 순환골재 사용에 따른 부재 내부의 파괴메커니즘에 관한 연구는 특히 미비한 실정이다.

음향방출(Acoustic emission, 이하 AE) 기법은 현재까지 많은 연구가 콘크리트 재료로 구성된 부재의 균열발생 및 진전과 AE 신호 특성을 분석⁽⁴⁾하는 데에 주로 이용되어져 왔다. 그러나 현재 정부의 순환골재 사용유도정책 및 순환골재 사용량의 지속적인 증가를 고려할 때 철근콘크리트 건설 구조물의 진전성 및 손상평가에 AE 기법을 적용하기 위해서는 천연골재만으로 이루어진 콘크리트의 파괴 특성과 AE 신호에 대한 분석이 아닌 순환골재 콘크리트 및 순환골재와 천연골재가 복합적으로 사용된 콘크리트로 연구범위를 확대하여 순환골재의 대체에 따른 철근콘크리트 부재의 거동특성 및 손상진전에 따른 AE 신호와의 상관성에 대한 규명이 요구된다고 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 순환골재를 사용한 콘크리트의 단조 및 반복가력시 압축파괴 및 거동특성을 천연골재의 거동특성과 비교하고, 순환골재 사용에 따른 콘크리트 내의 손상메커

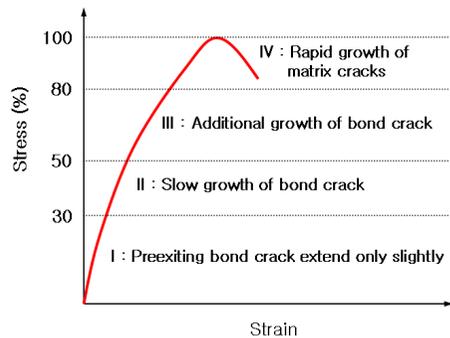


Fig. 1 콘크리트의 손상단계(Thomas, 1963)

Table 1 콘크리트의 손상단계(Thomas, 1963)

Stage	σ / f_{cu} (%)	Damage proces
I	0~30	응력-변형도 관계에 거의 영향을 미치지 않는 미세균열 발생
II	30~50	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 및 내력상실

니즘을 비파괴적으로 비교·분석하여 순환골재의 구조 부재 적용가능성 규명 및 순환골재를 사용한 철근콘크리트 구조물의 건전성 및 손상평가 시스템 구축을 위한 기초 자료로 활용하고자 한다.

2. 콘크리트의 압축 파괴특성

Thomas 등⁽⁵⁾의 연구결과에 따르면 취성적인 파괴 특성을 지니고 있는 콘크리트는 상층구간의 경우 Fig. 1과 같이 손상단계에 따라 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 보고되고 있다. 이러한 콘크리트는 중심축력 작용시 미세균열 진전 및 파괴특성에 따라 Table 1과 같이 4단계로 분류할 수 있다.

3. 실험

3.1 시험체 계획

본 연구에서는 순환골재 품질기준(굵은골재 흡수율 3%이하, 잔골재 흡수율 5%이하)을 만족할 뿐만 아니라 천연골재와 대등한 성능을 갖도록 생산한 고품질의 순환골재를 적용하였으며, 중심축력을 받는 콘크리트의 거동 특성과 이에 따른 AE 신호를 비교·분석하여 콘크리트의 손상진전에 따라 발생하는 AE 특성을 규명하고자 하였다. 이에 골재종류에 따른 총 3개의 표준압축공시체를 사용하였으며, 콘크리트 배합은 Table 2에 나타난 바와 같다.



Fig. 2 사용골재의 입형

3.2 사용재료

콘크리트 압축공시체 제작에 사용된 시멘트는 1종 보통포틀랜드시멘트(비중 3.15)를 사용하였으며, 혼화제는 플라이애시(비중 2.13, 분말도 3,160 cm²/g), 혼화제는 폴리카르보산계 고성능AE감수제를 사용하였다. 사용된 천연골재 및 순환골재의 입형 및 물리적 특성은 Fig. 1 및 Table 3에 각각 나타내었다.

3.3 시험체 설치 및 측정방법

골재 종류에 따른 시험체의 단조 및 반복압축거동특성을 규명하기 위하여 2,000kN 용량의 UTM을 사용하여 중심축력을 가력하였으며, 반복가력계획은 Fig. 3과 같다. 가력시 UTM과의 부착마찰에 의한 구속을 고려하여 중앙부 100mm 구간을 축변형률 측정범위로 하였으며, 가력시 콘크리트의 손상발생에 따른 AE 신호 특성을 계측하기 위하여 공시체 중앙부에 Fig. 4

Table 2 콘크리트 배합

Specimen	W/C (%)	Slump (cm)	FA ratio (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)						
					W	C	FA	NG	NS	RG	RS
NN	45	23±2	15	46	175	331	58	927	763	0	0
NR	50	15±2	15	47	175	298	53	979	409	0	402
RN	45	23±2	15	46	175	331	58	0	763	888	0

Table 3 골재의 물리적 성질

	Normal aggregate	Normal sand	Recycled aggregate	Recycled sand
Density (g/cm ³)	2.65	2.56	2.54	2.47
Absorption (%)	1.39	1.42	1.86	3.64
Fineness modulus	6.02	2.84	6.74	2.89

및 5와 같이 AE 센서를 총 4개 설치하여 실험 종료 시까지 AE 신호를 측정하였다. AE 센서는 100~900 kHz의 광대역 센서이고 이를 프리앰프에 연결하여 Vallen사의 AMSY4를 사용하여 측정하였다.

4. 실험 결과

4.1 강도특성 및 AE 이벤트 수

골재종류에 따른 콘크리트의 단조 및 반복가력시 강도특성을 Fig. 6에 나타내었으며, 이를 정리하면 Table 4와 같다. Fig. 6(a)에 나타난 바와 같이 단조가력한 경우 천연골재를 사용한 NN 시험체와 순환잔골재를 50% 치환한 NR 시험체는 최대응력 등 압축거동특성이 유사한 것으로 나타났으나 순환굵은골재를 100% 치환한 RN 시험체에서 다소 높은 강도 및 탄성계수를 나타내어 순환굵은골재 100% 대체로 인

한 배합수 흡수로 인해 물시멘트비가 낮아진 것에 기인한 것으로 판단된다. 반복가력의 경우 Fig. 6(b)에 나타난 바와 같이 골재 종류에 관계없이 단조가력시 최대강도의 80%인 5번째 사이클에서 모두 파괴되었으며, 단조가력과 마찬가지로 RN 시험체에서 가장 높은 강도를 보였다. 또한 Fig. 7에 나타난 바와 같이 강성특성을 비교한 결과 NN 및 RN 시험체의 강성은 유사한 것으로 나타났으며, NR 시험체에서 다소 낮게 나타났다. 반복가력시 변형률 변화를 비교한 결과, $0.5f_{cu}$ 가력시 $0.3f_{cu}$ 에 비해 60% 이상 증가하였으며, $0.8f_{cu}$ 가력시에는 $0.5f_{cu}$ 에 비해 70%~100% 이상 증가하는 등 순환굵은골재를 치환한 RN 시험체에서 변형률 증가가 가장 크게 나타났다.

이러한 각 시험체의 응력-변형률을 최대응력 및 그때의 변형률로 무차원화하여 누적 AE 이벤트 수와 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에 나타난 바와 같이 최대내력의 30%(1단계)까지는 모든 시험체에서

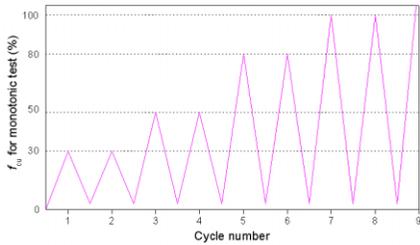


Fig. 3 반복가력계획



Fig. 4 실험장치

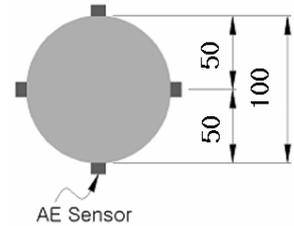


Fig. 5 AE센서의 위치

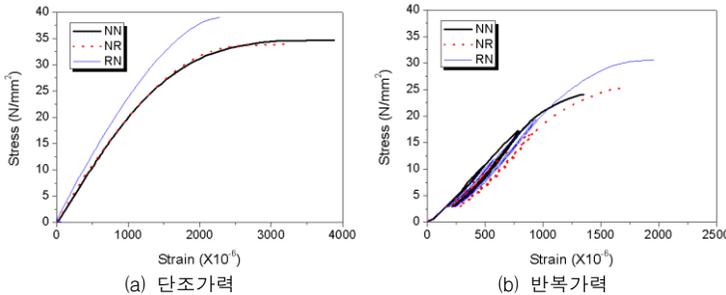


Fig. 6 응력-변형도 관계곡선

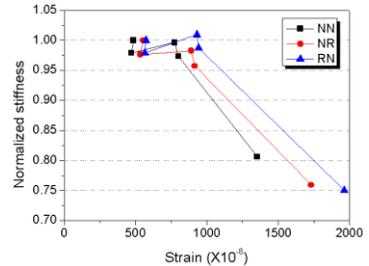


Fig. 7 강성 비교

Table 4 단조 및 반복가력시 강도특성

Specimen	Monotonic loading			Repeated loading					
	f_{cu} (N/mm ²)	ϵ_{cu} ($\times 10^{-6}$)	Ec (kN/mm ²)	f_{cu} (N/mm ²)	ϵ_i ($\times 10^{-6}$)				
					1-1	1-2	2-1	2-2	3-1
NN	34.67	3,887	20.90	46.19	485	470	773	800	1,353
NR	33.91	3,245	21.27	41.28	553	533	893	915	1,730
RN	39.04	2,280	25.37	45.48	573	565	930	943	1,963

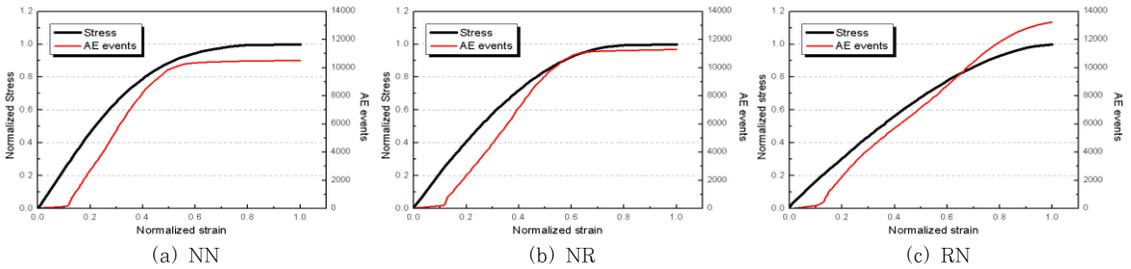


Fig. 8 응력-이벤트 관계

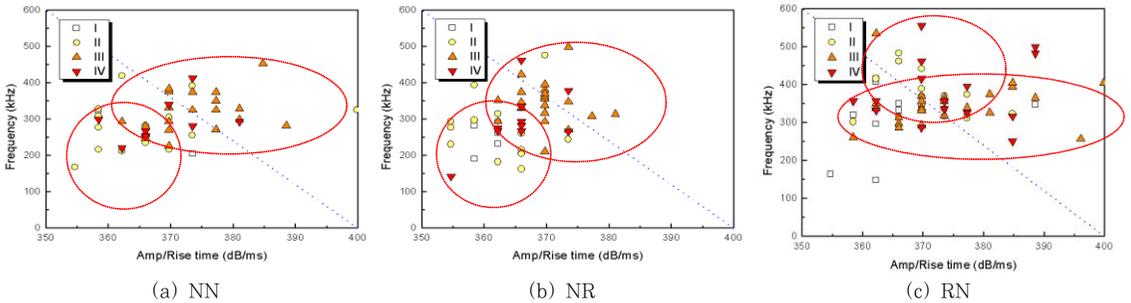


Fig. 9 진동수-AR 관계

AE 이벤트 수가 거의 나타나지 않았으며, 이후 증가하다가 최대내력의 80% 이후(IV단계) 증가량을 보이지 않았다. 반면 순환굽은골재를 사용한 RN 시험체에서는 최대내력의 80% 이후에도 이벤트의 지속적인 증가량을 보이며 최종 파괴되었다. 이는 압축거동시 순환굽은골재로 치환됨으로 인해 높은 하중 하에서 전달되는 균열응력 및 손상량이 후반부에 집중되어 있음을 의미하며, 이러한 후반부의 손상집중현상으로 인해 일반 콘크리트보다 더욱 취성적 파괴양상을 보이는 것으로 판단된다.

4.2 AR 값

Fig. 9는 각 시험체에서 측정된 파형 중 상승시간(Rise time)에 대한 진폭(Amplitude)의 비를 진동수(Frequency)와 손상단계별로 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 9에 나타난 바와 같이 손상단계 I(Stage I)에서는 모든 시험체에서 유사한 신호특성을 보였으나, 손상단계 II에서는 천연골재 및 순환잔골재를 사용한 NN 및 NR 시험체에서 360dB/ms 내외의 AR 값을 보인 반면, 순환굽은골재를 사용한 RN 시험체에서는 370dB/ms의 값을 나타내었다. 또한 III 및 IV단

계에서는 순환골재를 사용한 시험체에서 AR 값 및 진동수가 동시에 증가하는 경향을 보이고 있으며, 특히 순환굽은골재를 100% 혼입한 RN 시험체에서 그 증가폭이 가장 크게 나타났다. AR 값과 진동수와의 관계를 분석한 결과, 순환굽은골재를 대체함에 따라 압축거동시 발생하는 균열양상 중 전단균열에 비해 인장응력에 의해 발생하는 경향이 커짐을 알 수 있었다.

4.3 에너지-지속시간 관계

부재의 손상에 따른 AE 에너지(Energy)는 지속시간(Duration time), 진폭 등 여러 가지 요인에 의해 영향을 받으며, Fig. 10은 이 중 AE 에너지에 대한 지속시간의 영향을 나타낸 것이다. 전반적으로 AE 에너지와 지속시간은 앞서 언급한 바와 같이 비례적 관계를 보이고 있으나, 순환골재를 사용한 NR 및 RN 시험체에서는 지속시간 2~4ms 범위 내에서 에너지량이 다소 낮게 나타났다. 또한 6~8ms의 지속시간 범위에서는 80,000eu를 넘어서는 에너지가 발생하였으며, 특히 RN 시험체에서는 20,000eu 이하의 에너지가 다른 시험체와 달리 4ms 이상의 지속시간에서도 나타났다. 이는 전술한 바와 같이 순환골재에 잔존되

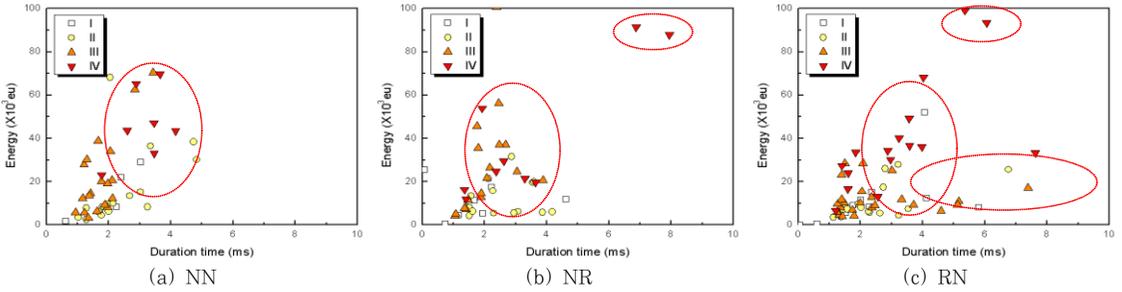


Fig. 10 에너지-지속시간 관계

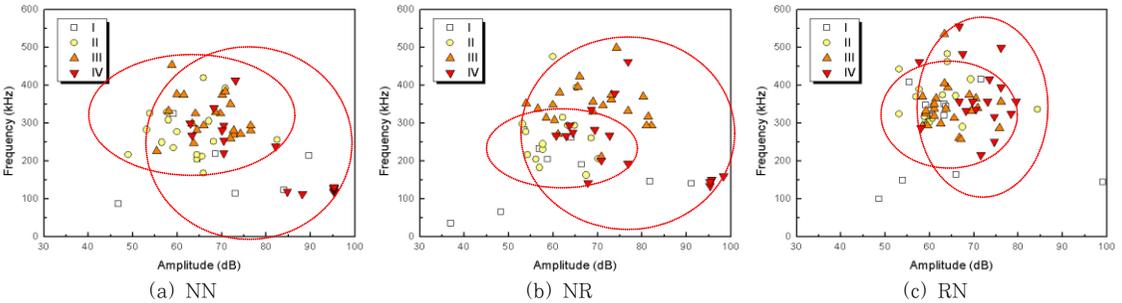


Fig. 11 진동수-진폭 관계

어 있는 부착모르타에 의해 골재에 전달되는 압축응력 분배 및 저항능력이 감소되어 AE 에너지에 대한 지속 시간의 기여분이 감소되었기 때문인 것으로 판단된다.

4.4 진동수-진폭 관계

Fig. 11은 각 시험체의 손상단계별 진동수와 진폭의 관계를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 I단계 및 III단계에서는 모든 시험체에서 유사한 경향을 보이고 있다. 그러나 II단계에서는 NN 시험체에서 200~400kHz의 진동수 분포를 보이는 반면, NR 및 RN 시험체에서는 각각 300kHz 이하 또는 이상의 값을 나타내는 등 천연골재 사용시와 상이한 진동수 특성을 보였다. 이는 $0.3 \sim 0.5f_{cu}$ 사이의 응력 발생시 순환골재 표면에 부착된 시멘트 페이스트로 인해 골재 사이의 인장 및 전단으로 인한 부착균열 양상이 상이하게 나타났기 때문인 것으로 사료된다. 또한 균열 및 횡변형량의 급격한 증가하는 IV단계에서는 RN 시험체에서 60~80dB의 좁은 범위의 진폭과 200~600kHz의 다소 높은 진폭을 보이는 등 다른 시험체와 상이한 AE 신호양상을 나타내었다.

4.5 이벤트 수

Fig. 12 및 13은 이벤트-진폭 관계 및 실험에 사용된 공시체의 측정구간(100mm)에 대한 상대 이벤트 수를 나타낸 것이다. Fig. 12에 나타난 바와 같이 누적이벤트 수는 전반적으로 골재 종류에 관계없이 유사한 것으로 나타났다. 그러나 Fig. 13에 나타난 바와 같이 천연골재를 사용한 NN 시험체에서는 대부분 4~8%의 이벤트 수가 위치에 따라 비교적 고르게 분산된 반면, 순환골재를 사용한 NR 및 RN 시험체에서는 8% 이상의 이벤트 수가 국부적으로 발생하는 등 작용하는 압축응력을 적절히 분배하지 못하는 것으로 나타났다.

4.6 펠리시티비

콘크리트와 같은 취성적 재료에서도 반복하중에 의한 손상발생시, 측정되는 AE 신호특성 중 펠리시티비 또는 카이저효과 등을 통하여 손상 중의 결함존재 여부를 판정할 수 있다.⁽⁶⁾ Fig. 14는 반복 하중에 의한 각 시험체의 누적 이벤트 수-응력 관계를 나타낸 것이

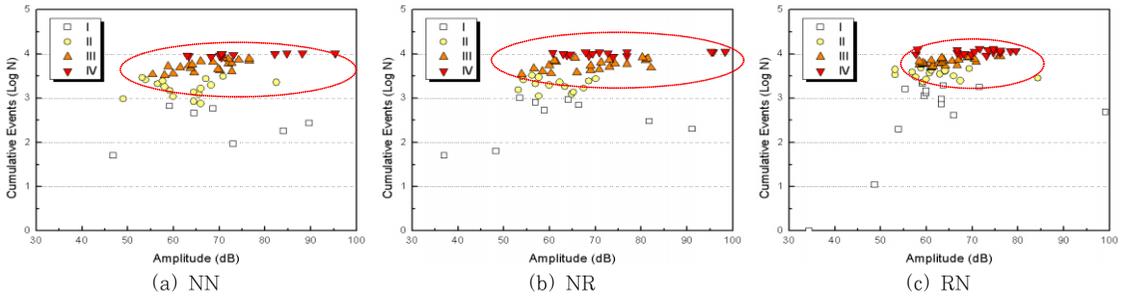


Fig. 12 이벤트-진폭 관계

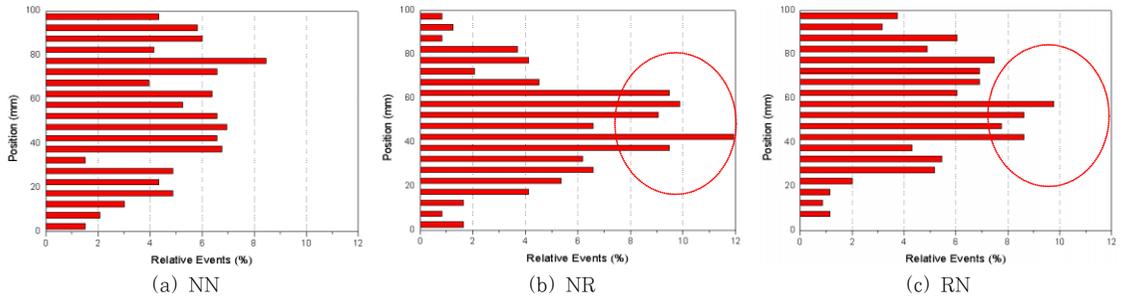


Fig. 13 측정 위치에 따른 상대 이벤트수

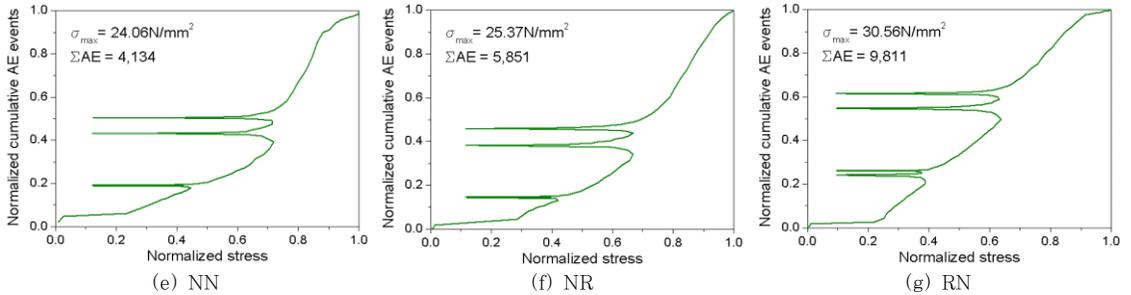


Fig. 14 반복가력에 따른 누적 AE이벤트수

며, 계산된 펠리시티비(Felicity ratio)를 각 시험체 별로 정리하여 Fig. 15 및 Table 5에 나타내었다. 모든 시험체에서 단조가력시 최대하중의 50%인 3사이클까지는 카이저 효과가 존재하는 것으로 나타났으나, 동일 하중을 가력한 4사이클 및 단조가력시 최대하중의 80%를 가력한 5사이클에서는 FR값이 0.68~0.83을 보여 반복하중에 의한 시험편 손상이 심각한 것으로 나타났다. 특히 4사이클 이후의 FR 값은 NN>NR>RN 순으로 크게 나타나 압축거동특성에서 나타난 바와 같이 순환굽은골재의 100% 치환으로 인한 압축력 저항능력이 현저히 저하되는 것으로 나타났다. 이는 콘크리트가 압축력을 받을 때 이에 저항하

는 재료 내부의 순환굽은골재가 계구조물의 콘크리트 강도값에 영향을 받으며, 특히 순환골재 제조시 일부 생산되는 순수 모르타르 덩어리와 같은 골재가 혼입되었기 때문인 것으로 사료된다.

5. 결론

- 1) 순환골재를 사용한 콘크리트의 AE측정결과, 천연 골재 사용시 콘크리트의 압축거동에서 발생하는 미세균열의 진전으로 인한 응력의 재분배가 일어나는 반면, 순환골재 사용시에는 골재 표면에 붙어 있는 부착모르타르로 인해 골재와 시멘트 페이스트

간의 부착마찰력이 저하되어 작용되는 압축응력을 고르게 분산시키지 못하고 III 및 IV단계(최대응력의 50~80%) 이후부터 AE 이벤트 수, 지속시간, 에너지 등 AE신호가 상이한 양상을 보이는 등 압축으로 인한 손상이 후반부의 높은 응력부에 집중되어 있는 것으로 나타났다.

2) II단계에서는 NN 시험체에서 200~400kHz의 진동수 분포를 보이는 반면, NR 및 RN 시험체에서는 각각 300kHz 이하 또는 이상의 값을 나타내는 등 천연골재 사용시와 상이한 진동수 특성을 보였다. 이는 $0.3 \sim 0.5f_{cu}$ 사이의 응력 발생시 순

환골재 표면에 부착된 시멘트 페이스트로 인해 골재 사이의 인장 및 전단으로 인한 부착균열 양상이 상이하게 나타났기 때문인 것으로 사료된다. 또한 균열 및 횡변형량이 급격히 증가하는 IV단계에서는 RN 시험체에서 60~80dB의 좁은 범위의 진폭과 200~600kHz의 다소 높은 진폭을 보이는 등 다른 시험체와 상이한 AE 신호양상을 나타내었다.

3) 순환골재를 치환한 시험체 중 순환균은골재를 치환한 시험체에서 압축거동시 순환잔골재에 비해 더욱더 높은 응력하에 손상분포가 집중되었다. 이는 순환균은골재 사용시 콘크리트에 전달되는 압축응력을 초기단계에서부터 적절히 소산시키지 못하였기 때문인 것으로 판단되며, 이로 인해 반복하중하에서도 FR 값이 천연골재보다 낮게 나타나는 등 더욱 취약적인 파괴특성을 보였다. 따라서 추후 이에 관한 순환균은골재의 입형, 크기, 흡수율 등과 같은 물리적 특성 및 콘크리트 제조방법 등에 관한 연구가 요구된다.

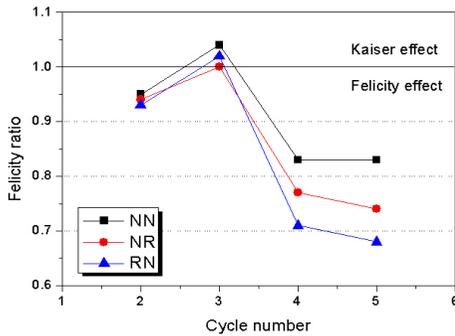


Fig. 15 펠리시티비 비교

Table 5 반복가력에 따른 펠리시티비 비교

Specimen	Cycle	σ_{max} (N/mm ²)	σ_{AE} (N/mm ²)	FR*	Remark
NN	1	10.70	-	-	-
	2	10.15	10.11	0.95	Kaiser effect
	3	16.98	10.51	1.04	Kaiser effect
	4	17.18	14.13	0.83	Felicity effect
	5	24.06	14.30	0.83	Felicity effect
NR	1	10.67	-	-	-
	2	10.04	10.04	0.94	Felicity effect
	3	16.94	10.00	1.00	Kaiser effect
	4	16.92	13.02	0.77	Felicity effect
	5	25.37	12.58	0.74	Felicity effect
RN	1	11.88	-	-	-
	2	11.48	11.09	0.93	Felicity effect
	3	19.49	11.76	1.02	Kaiser effect
	4	19.32	13.92	0.71	Felicity effect
	5	30.56	13.17	0.68	Felicity effect

* FR = σ_{max}/σ_{AE}

σ_{AE} : 이전 사이클에서의 최대응력

σ_{max} : 다음 재하과정에서 AE 신호가 발생하기 시작한 응력

FR>1 : 시험편이 안정한 상태

FR=1 : 카이저효과가 존재하는 상태

FR<1 : 시험편이 손상된 상태를 나타낸다.

참고문헌

- 윤현도, 김선우, 전에스터, "보강섬유 종류에 따른 고인성 시멘트 복합체의 손상과정 및 음향방출특성" 대한건축학회 논문집(구조계), Vol. 22 No. 9, 2006, pp. 35-42.
- 김윤수, 김선우, 윤현도, 서수연, 최창식, 최기봉, "골재 종류에 따른 콘크리트의 압축파괴 및 음향방출특성", 한국구조물진단학회 춘계학술발표대회논문집, Vol. 11, No. 1, 2006, pp. 1-4.
- 菊池雅史, "再生骨材の品質が再生コンクリートの品質に及ぼす影響", 日本建築學會構造系論文集 第474号, 1995, pp. 11-20.
- Japan Construction Material Standards JCMS-IIIB5706, "Monitoring Method for Active Cracks in Concrete by Acoustic Emission", The Federation of Construction Material Industries, 2003.
- Thomas T. C. Hsu, F. O. Slate, G. M. Sturman, "Micro-cracking of Plain Concrete and the Shape of the Stress-Strain Curve", ACI Journal, Proceedings, Vol. 60, No. 2, 1963, pp. 209-224.
- Yuyama, S., Okamoto, T., and Nagataki, S., "Acoustic Emission Evaluation of Structural Integrity in Repaired Reinforced Concrete Beams", Materials Evaluation, Vol. 52, No. 1, 1994, pp. 86-90.

(접수일자 : 2006년 12월 23일)