

# 콘크리트 강도수준별 음향방출(Acoustic Emission)의 특성에 관한 연구

## A Study on the Characteristic of Acoustic Emission with Concrete Compressive Strength Level

이 웅 종<sup>\*</sup> 이 중 열<sup>\*\*</sup> 정 연 식<sup>\*\*\*</sup> 양 승 규<sup>\*\*\*\*</sup> 한 상 훈<sup>\*\*\*\*\*</sup>  
Lee, Woong Jong Lee, Jong Ryul Chung, Youn Sik Yang, Seung-Kyu Han, Sang Hoon

### ABSTRACT

The acoustic emission(AE) signal from concrete cylinder specimen during failure process under cycling compressive loads were recorded and analyzed. Different filters were set on the AE signal duration based on the characteristic of amplitude distribution. From the value of AE signal amplitude, which corresponds to the occurrence of the peak for AE hits, the AE signals from concrete compressive specimen were divided into five sections. The relationship between the AE signal section and the failure mechanism of these materials, analyzed on the meso-structure level was determined. Based on the experiments, the AE characteristics of each failure mechanism are given. The results show that the AE technique is a valuable tool to study the failure mechanism of concrete.

#### 1. 서론

금속재료 및 비금속 재료를 대상으로 비파괴 평가를 위한 도구로서 음향방출(Acoustic Emission)기법은 폭넓게 사용되어 왔다. 최근에는 파괴과정 동안에 균열확장의 성질에 초점을 맞추어 콘크리트의 손상 메커니즘 규명에 적용하고자 하는 연구가 진행 중에 있다.

AE는 재료내의 균열 진전으로부터 야기된 변형에너지의 갑작스런 해방에 의해 발생한다. 여기서 AE는 재료 파괴에 대한 풍부한 정보를 포함하고 있다. 이러한 정보는 콘크리트에서의 파괴과정과 성질변화를 검출하는데 적용될 수 있다. 재료는 여러 종류의 손상메커니즘으로 파괴가 되고 각각의 메커니즘은 뚜렷한 AE 신호 파라미터를 포함하고 있다. Ely와 Hill은 graphite-epoxy 시편에서의 AE신호는 매트릭스 균열발생, 섬유파괴 및 박층 분리에 대응하는 AE 신호의 지속시간과 상승시간에 근거하여 분류함으로써 뚜렷한 진폭 띠로 구별할 수 있음을 제시하였다. AE 신호 파라미터들은 원리상 AE의 진폭, 카운트, 에너지, 지속시간 및 상승시간을 해석하는 것에 의하여 파괴메커니즘을 구별하는데 사용될 수 있다.

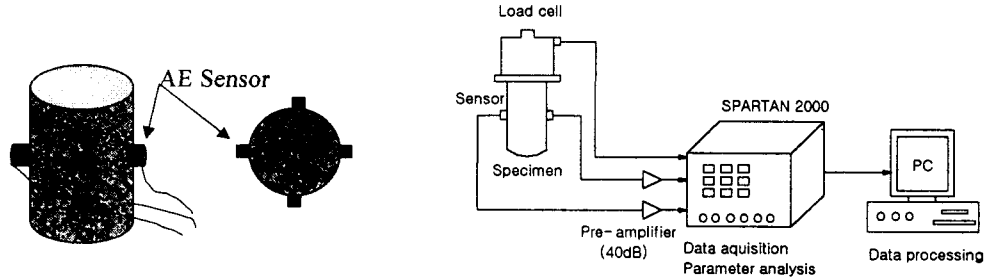
본 연구에서는 일축압축 반복하중 하에 파괴과정 동안에 콘크리트 압축강도 시편으로부터의 AE신호가 기록하였고, 필터링(Filtering)방법은 진폭분포 특성에 따른 AE 신호 지속시간에 근거하였다. 실험결과 콘크리트의 압축강도 수준에 관계없이 AE신호가 5개의 손상메커니즘을 포함하고 있음을 확인하였고, 이러한 파괴메커니즘은 거시적 구조 특성 측면에서 해석이 가능할 것으로 판단된다.

\*정회원, 쌍용중앙연구소 콘크리트연구실 주임연구원  
\*\*정회원, 쌍용중앙연구소 콘크리트연구실 실장  
\*\*\*정회원, 쌍용중앙연구소 콘크리트연구실 선임연구원  
\*\*\*\*정회원, 쌍용중앙연구소 콘크리트연구실 연구원  
\*\*\*\*\*정회원, 충북대학교 토목공학과 교수

## 2. 실험내용

### 2.1 측정시스템

콘크리트의 손상메커니즘을 분석하기 위한 시험체는 원주형( $\phi 10 \times 20\text{cm}$ )공시체를 사용하였고, 하중 재하방법은 일축압축 반복하중을 파괴 시까지 재하하였다. 대략 150 kHz 공명주파수를 갖는 4개의 PAC 15 트랜스듀서(센서)는 AE 활동성을 모니터링하기 위해 시험체의 길이방향 중앙에 설치하였으며, 그림 1에 제시하였다. AE 신호는 예비증폭기(Preamplifier)에서 40dB로 증폭되고 AE 시스템에서 다시 20dB로 증폭되었다. 문턱값(Threshold)은 높은 S/N(신호/잡음)비를 제거하기 위하여 48dB로 설정하였다.



<그림 1> AE 센서의 설치 위치와 AE 측정시스템

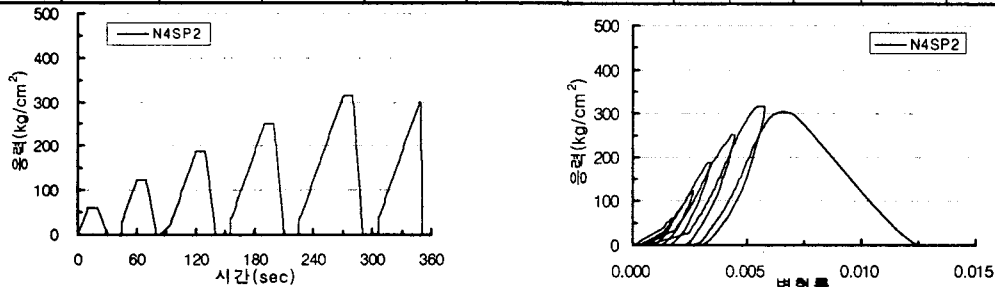
### 2.2 시험체 제작 및 기본 물성 측정결과

본 연구에서는 콘크리트의 압축강도 수준별 손상메커니즘을 분석하기 위해서 사용된 시험체는 3수준으로 설정하였고, 사용된 배합비는 다음 표 1과 같으며, 굵은 골재 최대치수는 25mm를 사용하였다. 한편, 시험체 제작후 양생조건은 실험의 편의를 위해 기건양생으로 실시하였으며, 재령별 압축강도 및 탄성계수 측정결과는 다음 <표 2>와 같다. 시험체별 28일 압축강도 레벨은 각각 300, 400, 500kgf/cm<sup>2</sup>으로 대략 100kgf/cm<sup>2</sup> 간격을 확보하고 있는 것을 실험결과로부터 알 수 있다.

콘크리트 강도수준별 음향방출특성을 분석하기 위한 시험체의 하중재하 방식은 일축압축 반복하중으로 재하하였으며, 반복 하중재하이력과 응력변형률 곡선의 측정에는 <그림 2>와 같다.

<표 1> 콘크리트 배합비 및 기본물성 측정결과

시험 체명	단위재료량(kgf/cm <sup>3</sup> )		단위재료량(kgf/cm <sup>3</sup> )				압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )			탄성계수( $\times 10^5$ )		양생 조건
	물-시멘트 트비(%)	잔골재율 (%)	시멘트 (kgf/cm <sup>3</sup> )	물 (kgf/cm <sup>3</sup> )	잔골재 (kgf/cm <sup>3</sup> )	굵은골재 (kgf/cm <sup>3</sup> )	3일	7일	28일	7일	28일	
N2	57	47	340	195	821	937	161	255	343	2.66	2.83	기건 양생
N3	46	44	441	201	730	930	218	343	452	2.66	3.14	
N4	38	42	553	209	653	895	308	430	540	2.92	3.37	

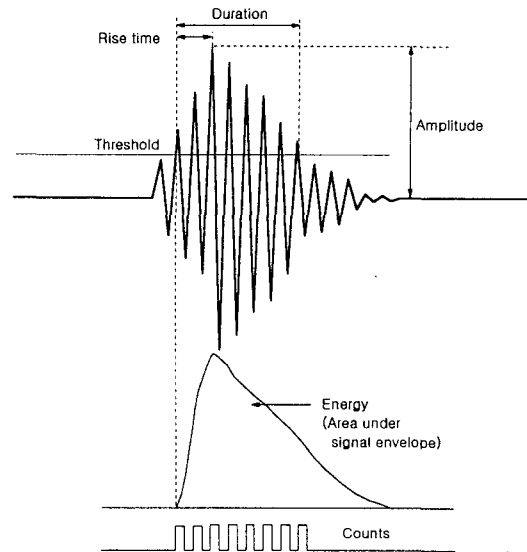


<그림 2> 하중재하이력과 응력변형률곡선 측정결과 예

### 3. 손상메커니즘 추출원리

#### 3.1 AE 신호 파라미터의 종류

AE 신호분석에 사용되는 파라미터는 <그림 3>에 나타낸 바와 같다. AE 신호분석 파라미터 결과 값은 문턱 값(threshold)의 영향을 받는 특성이 있다. 즉, AE가 검출되는 조건은 AE 신호가 문턱 값을 초과하여야만 되고, 더 이상 문턱 값 이상의 신호가 발생하지 않으면, 측정이 종료되고 새로운 신호가 문턱 값을 초과할 때까지 대기한다. 이 때 문턱 값을 초과한 후 더 이상의 문턱 값을 초과하지 않을 때까지를 하나의 이벤트(Event) 혹은 히트(Hits)로 정의하며, 일반적으로 측정정도는 천만분의 1초 정도( $1/10 \mu s$ )이다. 측정 센서의 수가 여러 개일 경우 각 센서에서의 이벤트는 Hits로 정의되고, 음원위치 측정(Source Location)과 같이 여러 개의 센서로부터 발생된 AE신호가 동일한 신호로 인식되면 이것이 하나의 이벤트로 간주된다. AE 파라미터는 최대진폭(Amplitude), 카운트(Count), 지속시간(Duration), 신호 에너지(Energy) 및 상승시간(Rise Time)으로 구성되어 있다.



<그림 3 > AE 신호 파라미터

#### 3.2 기본원리

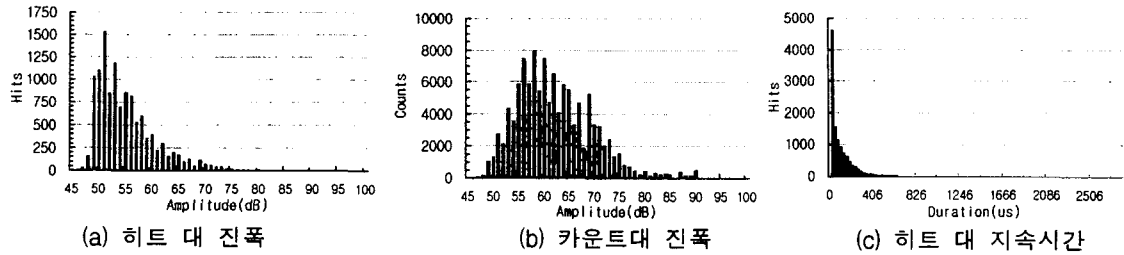
재료가 변형을 일으키고 파괴가 되면 대부분 여러 종류의 손상 메커니즘을 발생시키며, 이들 메커니즘의 각각은 특정한 AE 신호를 방출한다. 파괴과정 동안에 트랜스듀서(센서)가 수신한 AE신호는 여러 종류의 파괴메커니즘 모두가 합쳐진(Overlap) 정보를 포함하고 있다. 여러 파괴 메커니즘의 각각에 관련된 AE 신호를 추출하기 위해서, 본 연구에서는 다음과 같은 가정을 제안한다. (1) 같은 AE 활동성에 대해 에너지가 높게 발생할수록, 최대 진폭은 더욱 높아지고, 지속시간은 더 오래 지속된다. (2) 같은 손상메커니즘과 관계된 AE 활동성은 같은 특성치를 가진다. 여러 종류의 손상메커니즘에 의해 야기된 여러 종류의 AE 특성치를 추출하기 위한 필터링(Filtering)방법은 AE 지속시간으로 설정한다. 하나의 지속시간이 선정되었을 때 3개의 그래프로 나타낸다. (a) 히트 대 진폭 (b) 카운트 대 진폭 (c) 히트 대 카운트. 같은 시간에 대해 이들 3개 그래프의 형상과 특성이 비교된다. (a)와 (b)의 데이터로부터 계산된 카운트/히트의 비가 (c)의 그래프 히트 대 카운트의 최고치(peak)와 관계가 있는 동안에 (a) 그래프에서 히트 대 진폭의 최고치(peak)가 (b) 그래프에서의 카운트 대 진폭의 최고치와 같다면, 이때 이러한 지속시간에 포함된 손상메커니즘은 하나가 된다고 말할 수 있다. 상기와 같은 원리에 근거하여 일축압축 반복하중을 받는 콘크리트가 변형을 일으키고 파괴되는 전 과정동안에 발생한 여러 종류의 손상메커니즘은 각각 분리 및 구별할 수 있다.

#### 3.3 손상 메커니즘의 추출

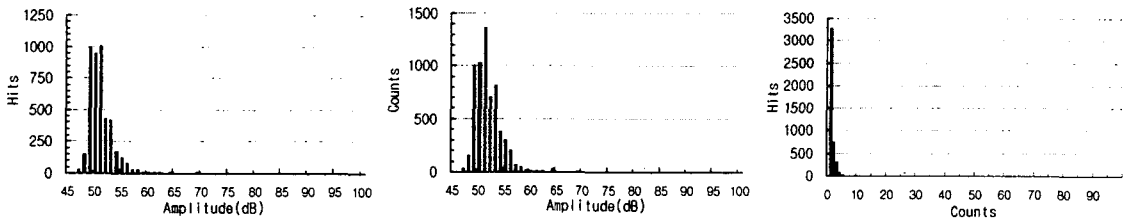
일축 압축 반복하중을 받는 원주형 공시체 N2시편의 파괴과정 동안에 총 11,823개의 히트와 115,659개의 카운트가 기록되었다. <그림 4>은 3.2절의 기본 원리에 근거해 나타낸 그래프이다.

<그림 4>의 (a)에서 히트의 최고치는 1,524이며, 51dB인 것으로 분석되었으며, 최고치 이후에는 지

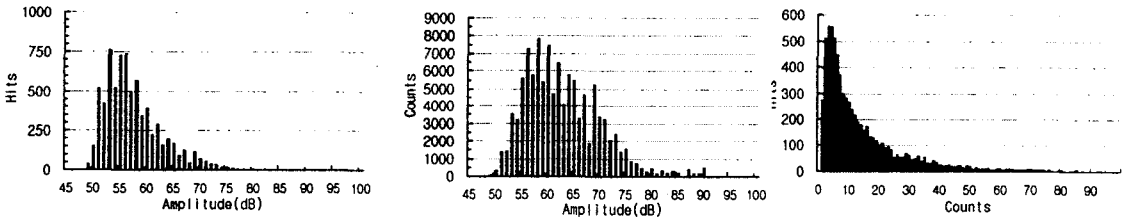
수 함수적으로 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 한편 (b)에서 카운트의 최고치는 7,897로서 (a)의 51 dB보다 더 높은 58dB인 것으로 확인 할 수 있다. <그림 4> (a)와 (b)로부터 최고치 값이 다른 것을 확인할 수 있었으며, 이것은 여러 개의 손상메커니즘이 합쳐져 있는 것임을 지적한다.



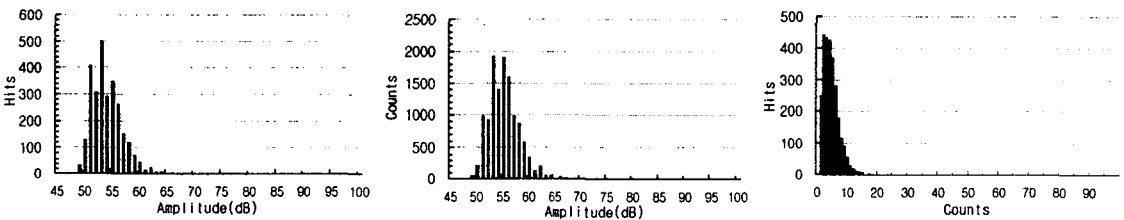
<그림 4> 일축압축 반복하중을 받는 원주형 공시체의 파괴과정중 획득한 AE 신호



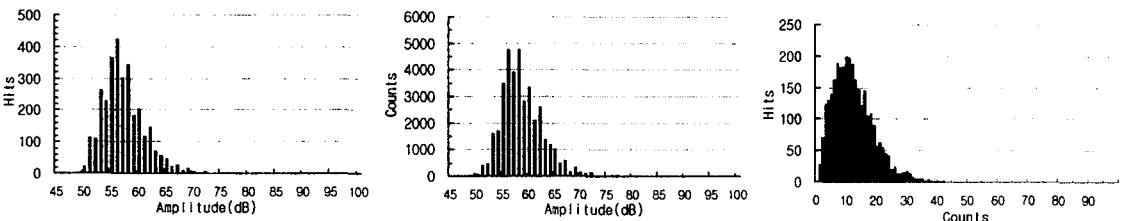
<그림 5> 손상 메커니즘 1의 AE 신호



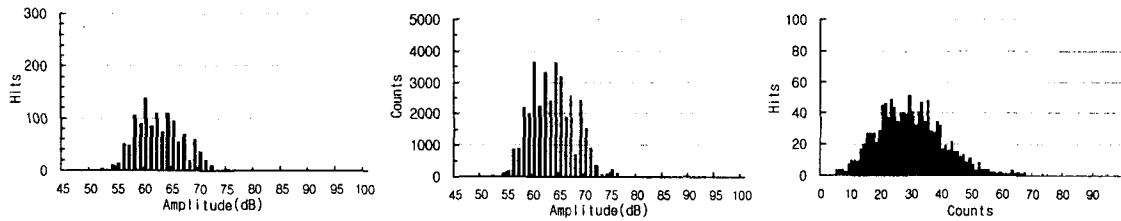
<그림 6> 손상 메커니즘 1만을 제거한 AE 신호



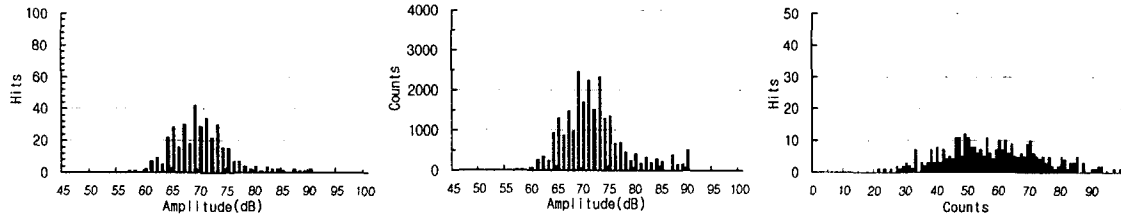
<그림 7> 손상 메커니즘 2의 AE 신호



<그림 8> 손상 메커니즘 3의 AE 신호



<그림 9> 손상 메커니즘 4의 AE 신호



<그림 10> 손상 메커니즘 5의 AE 신호

따라서 여러 개의 손상메커니즘으로부터 각각의 손상메커니즘을 분리하기 위한 첫 번째 단계는 제일 낮은 진폭에 대응하는 손상메커니즘을 분리해내는 것이다. 1단계 필터링은 지속시간을  $0\sim 20\mu s$ ,  $0\sim 25\mu s$ ,  $0\sim 30\mu s$ ,  $0\sim 35\mu s$ 로 설정하여 각각 분석하여 보았다. 콘크리트 압축강도 수준별 거의 동일한 메커니즘으로 유도되는 1단계 필터링은  $0\sim 25\mu s$ 인 것으로 분석되었다. 이의 분석 결과는 <그림 5>에 제시하였다. 이러한 결과는 K. Wu 등에 의해 제안된 콘크리트의 손상메커니즘과 동일한 연구결과이다. <그림 5>에서 히트의 최고치는 1,003이고 카운트의 최고치는 1,358이며 이에 대응하는 진폭은 51dB로서 동일한 최고치를 나타내는 것을 확인할 수 있으며, 손상메커니즘 1의 총 히트수는 4,438이고, 총 카운트는 6,191로서 카운트/히트의 비는 1.39로 분석되었으며, 이는 <그림 5>의 (c)에서 대략적으로 일치하고 있음을 확인할 수 있다. <그림 6>은 <그림 4>의 본래의 AE신호로부터 손상메커니즘 1을 제거하고 난 후의 AE 신호를 나타낸 것으로 히트와 카운트의 최고치에 대응하는 진폭은 각각 53dB과 58dB로 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있었고 이는 또한 여러 개의 손상메커니즘이 합쳐져 있다는 것을 의미한다. 계속해서 이러한 방법으로 손상메커니즘을 분리해 낸 결과는 <그림 7>~<그림 10>과 같이 손상메커니즘을 2~5로 추출하였다.

#### 4. 결과분석

3절의 손상메커니즘 추출방법에 따라 콘크리트의 압축강도 수준별 손상메커니즘에 대한 AE 파라미터의 특성을 분석한 결과는 다음 <표 3>~<표 5>와 같다. 분석결과에 의하면 콘크리트의 압축강도가 증가함에 따라 발생된 AE 히트수도 증가하는 것으로 분석되었다(평균적으로  $N2(23,282) \rightarrow N3(48,340) \rightarrow N4(78,734)$ ). 그러나 콘크리트의 압축강도 수준에 관계없이 손상메커니즘은 5개로 분리시킬 수 있음을 알 수 있다. K. Wu 등에 의해 제안된 콘크리트의 손상 메커니즘은 7단계로 추출할 수 있음을 제안하였으나 본 연구와는 3가지 측면에서 차이점을 갖으며, <표 6>에 제시하였다. 즉, 문턱값이 본 연구방법이 높게 설정된 관계로 진폭이 50dB이하의 손상 메커니즘은 추출하지 못하였으며, 반복 하중 재하방법, 즉 하중을 제거하는 단계의 추가로 인한 손상메커니즘이 증가하였고, 파괴모드의 차이로 인한 손상메커니즘의 차이가 발생한 것으로 분석되었다.

<표 3> 원주형 공시체 N2의 손상메커니즘에 대한 AE 파라미터 특성

시험 체명	메커 니즘	Amp. Peak	C/H Ratio	Duration	Hits	총 Hits 백분율(%)	Counts	시험 체명	메커 니즘	Amp. Peak	C/H Ratio	Duration	Hits	총 Hits 백분율(%)	Counts
N2-1	1	51	1.39	0~25	4438	37.5	6191	N2-2	1	51	1.51	0~25	12793	36.8	19370
	2	53	4.49	26~82	2728	23.1	12258		2	53	3.99	26~51	4454	12.8	17762
	3	56	12.17	83~214	3088	26.1	37580		3	55	8.59	52~148	9378	27.0	80519
	4	60	29.41	215~415	1203	10.2	35377		4	60	28.01	419~931	7942	22.9	222457
	5	69	66.27	416~2894	366	3.1	24253		5	73	127.33	932~3191	175	0.5	22282

<표 4> 원주형 공시체 N3의 손상메커니즘에 대한 AE 파라미터 특성

시험 체명	메커 니즘	Amp. Peak	C/H Ratio	Duration	Hits	총 Hits 백분율(%)	Counts	시험 체명	메커 니즘	Amp. Peak	C/H Ratio	Duration	Hits	총 Hits 백분율(%)	Counts
N3-1	1	51	1.52	0~25	12277	34.4	118611	N3-2	1	51	1.49	0~25	19016	31.2	28353
	2	55	7.84	26~166	15001	42.0	117576		2	55	7.46	26~165	25668	42.1	191594
	3	60	26.12	167~395	5606	15.7	14536		3	60	33.9	166~1383	15970	26.2	541410
	4	69	61.77	396~1241	2098	5.9	129598		4	75	210.49	1384~8650	3202	0.5	673587
	5	73	537.67	1242~6210	720	2.0	387120		5	97	1726.4	8651~10178	5	0.0	8632

<표 5> 원주형 공시체 N4의 손상메커니즘에 대한 AE 파라미터 특성

시험 체명	메커 니즘	Amp. Peak	C/H Ratio	Duration	Hits	총 Hits 백분율(%)	Counts	시험 체명	메커 니즘	Amp. Peak	C/H Ratio	Duration	Hits	총 Hits 백분율(%)	Counts
N4-1	1	51	1.49	0~25	22468	32.9	33524	N4-2	1	51	1.45	0~25	26768	30.0	28353
	2	56	8.28	26~187	30731	44.9	254412		2	55	6.30	26~130	29957	33.6	191594
	3	60	27.8	188~448	11242	16.4	312525		3	60	26.47	131~708	30329	34.0	541410
	4	71	80.1	449~2806	3869	5.7	309908		4	73	113.92	709~4431	2021	2.3	673587
	5	81	374.48	2807~4484	75	0.1	28086		5	90	555.78	4432~6650	9	0.0	8632

<표 6> K. Wu등이 제안한 방법과 본 연구방법의 손상메커니즘의 차이

구분	손상메커니즘 수	문턱값	하중재하	파괴모드	비고
K. Wu등이 제안한 방법	7	40dB	단조증가	휨파괴	
본 연구방법	5	48dB	반복하중	압축파괴	

5. 결론

본 연구에서는 일축압축 반복하중을 받는 원주형 콘크리트시편으로부터 손상메커니즘 추출방법에 대한 연구를 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 음향방출기법은 콘크리트의 손상메커니즘을 연구하기 위한 유용한 방법임을 알 수 있었다.
- 2) 손상메커니즘의 추출방법은 AE 지속시간에 근거하였으며, 분석결과 여러 개의 손상메커니즘들로부터 각각의 손상메커니즘이 뚜렷이 분리시킬 수가 있었다.
- 3) 실험결과에 근거하였을 때, 일축압축 반복하중을 받는 원주형 콘크리트시편의 손상메커니즘은 5가지로 구분할 수 있었다.

참고문헌

1. T. M. Ely, E. V. K. Hill, "Charaterization of filure mechani는 in graphite/epoxy tensile test specimen using AE data," Proceedings of Fourth International Symposium on AE from Composite materials, Seattle, WA., ASNT, 1992, pp. 187~199
2. Keru Wu, Bing Chen, Wu Yao, "Study on the AE characteristics of fracture process of mortar, concrete and steel-fiber-reinforced concrete beams," Cement and Concrete Research, Vol. 30, 2000, pp.1495~1500.