

# 국내 노후 콘크리트 포장의 러블라이제이션 공법 적용을 위한 적정 파쇄방법 개발

## Estimation of Optimim Rubblized Depth to Prevent Reflection Ckrack

이승우\* · 한승환\*\* · 전상민\*\* · 배재민\*\*

Lee, Seung Woo · Han, Seung Hwan · Chon, Sang Min · Bae, Jae Min

### 1. 개요

노후콘크리트 포장수명을 연장하기 위한 방안으로 아스팔트 덧씌우기가 일반적이거나 반사균열을 억제하기 어렵다는 단점이 있다. 노후화된 콘크리트포장 슬래브를 원위치에서 파쇄하여 기층재료로 활용하고 그 위에 덧씌우기 포장을 건설하는 원위치파쇄기층화공법은 기존 덧씌우기 보강 공법이 갖고 있는 반사균열 문제를 완벽하게 해결할 수 있는 장점을 가지고 있다. 파쇄 규격에 대한 국외(미국)적용기준은 파쇄된 콘크리트 기층의 평균입경을 25.4mm~76.2mm로 제한하고 있으며, 허용최대입경으로 127mm~203mm가 11개주, 228mm~381mm가 10개주로 분류되고 있다. 파쇄입도가 다른 만큼 상대강도 계수값이나 아스팔트 덧씌우기의 두께도 상이함을 알 수 있다. 반면 국내 콘크리트포장은 미국에 비하여 포장두께가 두껍고, 린콘크리트 보조기층을 사용하는 특이점을 가지고 있어 국외와 같이 전체 두께를 파쇄 시킬 경우 시공성과 경제성의 확보가 불리하다. 따라서, 파쇄된 노후콘크리트 포장층이 도로기층으로써의 역할을 확보하기 위한 적정 파쇄 깊이를 파악하기 위해 휠트랙킹과 피로마모시험기를 이용한 실내실험에서 적정 파쇄골재의 규격 및 깊이를 산정하였으며 이 결과를 만족하는 파쇄장비의 헤드 모양과 적정 타격에너지를 실제 시험도로 파쇄 실험으로 알아보고자 한다.

### 2. 반사균열을 억제를 위한 파쇄골재의 규격 및 깊이 산정

반사균열은 콘크리트 슬래브의 수평이동과 차량의 수직하중의 결과로 발생한다. 균열 위의 아스팔트층에 작용되는 수직하중은 아스팔트층 바닥에 휨응력을 일으킨다. 또한 균열을 가로질러 이동하는 윤하중은 아스팔트층 바닥의 수직방향으로 전단응력을 일으킨다. 휨응력은 온도로 인한 건조수축으로 발생하는 인장응력과 함께 휨파괴(Mode I)균열을 일으키고, 전단응력은 전단파괴(Mode II)균열을 일으킨다. 본 실험은 휨응력과 전단응력에 대한 반사균열 모사실험으로 파쇄골재가 존재할 경우 반사균열 억제 효과를 검토하기 위하여 AC층 하부에 파쇄골재가 10cm, 20cm 있는 경우와 AC층 하부에 콘크리트 균열이 직접 부착되어 있는 경우에 대하여 Mode I(휨모드), Mode II(전단모드) 반사균열 촉진 실험을 통하여 파쇄골재 깊이별 반사균열의 발생 및 전진을 반복하중 횟수에 따라서 측정하여 반사균열을 억제 할 수 있는 적정 파쇄깊이를 검토하였다.

Mode I(휨모드)실험은 균열선단 위에 아스팔트 상태를 모사하기 위하여 콘크리트 블럭 상면으로부터 2/3 깊이까지 10mm 틈을 만들고 아스팔트 공시체에 덧씌우기 형태로 부착 후 휠트랙킹 장비와 유압식 피로 시험기를 이용하여 그림 2.1과 같이 실험을 하였으며, Mode II(전단모드)반사균열 실험은 그림 2.2의 모식도와 같이 휠트랙킹을 100psi의 하중으로 왕복 실험을 하였다. 1)

\* 정회원 · 강릉대학교 토목공학과 조교수 · 공학박사 · 033-640-2419(E-mail:swl@kangnung.ac.kr)  
\* 정회원 · 한국도로공사 책임연구원 · 공학박사 · 031-371-3365(E-mail: hansu@freeway.co.kr)  
\* 정회원 · 강릉대학교 토목공학과 석사과정 · 공학사 · 033-640-2410(E-mail:chon@kangnung.ac.kr)  
\* 정회원 · 강릉대학교 토목공학과 석사과정 · 공학사 · 033-640-2410(E-mail:boy2nice@kangnung.ac.kr)

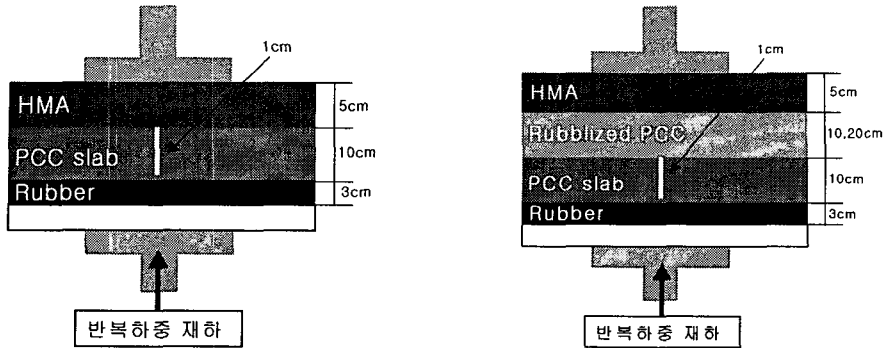


그림 2.1. Mode I 실험 모식도

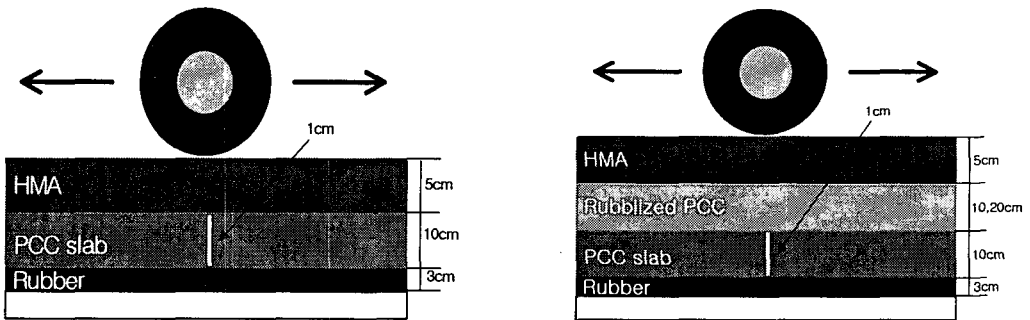


그림 2.2. Mode II 실험 모식도

시험은 균열이 아스팔트보 공시체 전체높이에 도달할 때 까지 수행하였으며 육안으로 반사균열의 진전을 확인하기 위해 백색페인트를 한쪽 면에 칠하였다 실내 실험결과 Mode I에서의 피로수명은 16000회에서 균열이 발생하기 시작하여 300000회에 아스팔트 전체 높이에 도달하였으나 파쇄골재를 중간층으로 사용한 경우는 300000회에 이를 때까지 반사균열이 발생하지 않았으며 Mode II(전단파괴)실험에서 피로 수명은 2000회에서 균열이 생기기 시작하여 1200회에 전체 높이에 도달한 반면, 파쇄골재를 중간층으로 사용한 골재는 20000회에 이를 때까지 반사균열이 발생하지 않았다. 이것은 반사 균열을 억제할 수 있는 최소 파쇄 골재층의 깊이는 그림 2.3~2.4의 그래프를 통해 10cm 정도임을 알 수 있다. 따라서 Rubblization 공법 적용시 최소 파쇄 깊이는 10cm 이상임을 알 수 있다.

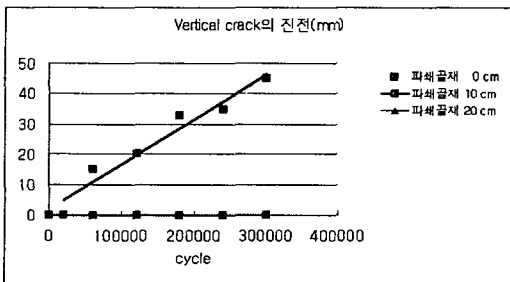


그림 2.3 Mode I Vertical Crack

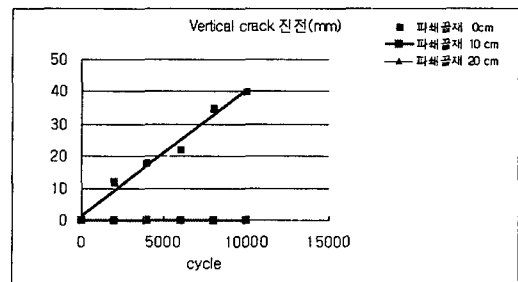


그림 2.4 Mode II Vertical Crack



### 3. 실험용 소형파쇄 장비(single head)제작 및 실험방법

실험 파쇄에 사용될 장비는 그림 3.1에서와 같이 폭 3.22m, 길이 2.93m, 높이 2m로 680kg의 자유낙하 시키는 방식으로 구성되어있다. 해머의 규격은 서로 다른 두께의 조항으로 중량을 최대 720kg으로 조절할 수 있도록 제작하여 조립하였다. 해머를 정확하고 원활하게 작동시키기 위하여 양쪽에 Guide Channel을 설치하고, 그 안에서 Guide - Wheel 4개가 작동하게 된다. 발전기를 장착하여 모터구동으로 원치로써 해머의 낙하 높이를 임의로 변화시킬 수 있으며 종방향으로의 움직임은 주행레일을 설치하여 모터구동으로 하고 횡방향은 수동으로 이동시켜 고정시킬 수 있도록 했다 또, 파쇄헤드/파쇄에너지/파쇄위치에 따른 파쇄규격의 산정을 위한 기초실험으로써 국내 콘크리트 포장특성에 맞는 파쇄 방법을 찾기 위해 파쇄에너지와 파쇄헤드 형상을 달리하여 쇠석보조기층과 린콘크리트 보조기층에 대해 각각 실험하였다. 외국의 경우 원위치파쇄기층화 공법의 가장 핵심 사항인 콘크리트 포장의 파쇄 시 골재의 형상 및 깊이를 알아보기 위해 표 3.1 ~3.2와 같이 세가지 Case의 에너지 변화와 세가지 Type의 파쇄헤드 형상을 고려하였다. 해머의 무게를 680kg으로 하였고 낙하 높이를 조절하여 최대 타격에너지를 6ton~12ton까지 변화하며 실험하였다.

파쇄 실험에 있어 적절한 파쇄 규격을 도출하기 위해서는 파쇄헤드 형상과 타격에너지 콘크리트 슬래브의 타격위치의 세 가지 경우가 적절한 조합을 이루어야 한다. 본 실험에서는 문헌연구를 통하여 어느 정도 검증된 파쇄 에너지와 파쇄 헤드 형상 및 파쇄간격을 바탕으로 경우의 수를 줄이고 최적의 파쇄규격을 도출하기 위하여 실험을 실시하였다.

표3.1 파쇄헤드 형상

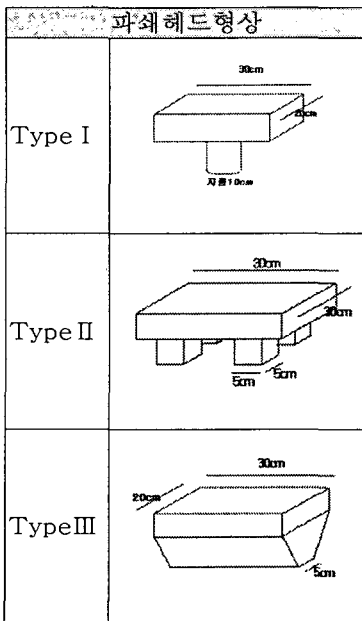


표 3.2 시험도로 현장 파쇄 실험 Case

시험도로 현장 파쇄 실험 Case					
		Weight (kg)	Drop Hight(m)	Load (ton)	비고
case1	Hammer	680	0.9	6	기존장비
	Wing Hammer		15.2	10	
case2	Hammer	680	0.72	4.8	기존장비의 80%
	Wing Hammer		1.2	8	
case3	Hammer	680	1.1	7.2	기존장비의 120%
	Wing Hammer		1.8	12	

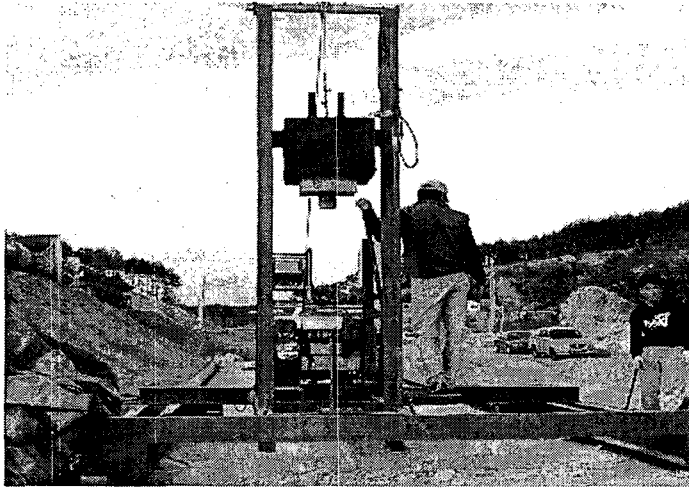
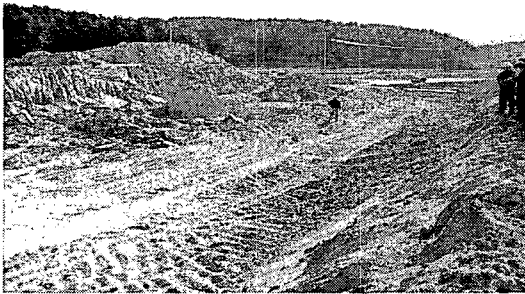


그림 3.1 실험용 파쇄장비

#### 4. 기초 파쇄실험용 콘크리트 포장 설계 및 시공

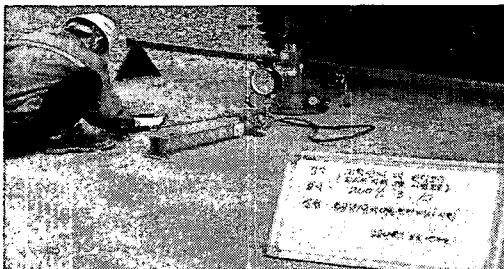
시험포장 구간의 위치는 강원도 강릉시 5호광장(7번국도) 입체 교차로 시설공사 내의 과학단지 진입도로 상에 건설되었다. 시험포장의 총길이는 32m로 8개의 단면을 가지고 있고 이 중 2개의 단면은 쇠석 기층을, 6개 단면은 린콘크리트 보조기층을 설치하였다. 또한 시험 포장 양쪽으로 파쇄실험 장비를 설치 할 수 있도록 폭 52cm의 파쇄장비 설치대를 만들었으며 시험도로 시공에 있어 모든 조건은 콘크리트 도로 시방서에 준하여 실시하였다. 시험도로 포장 공정은 그림 4.1, 시험 포장 구간의 단면은 그림 4.2와 같다. G는 콘크리트 슬래브 하부에 쇠석보조기층을 모사한 것이고 L은 린콘크리트 보조기층을 모사한 것이다.



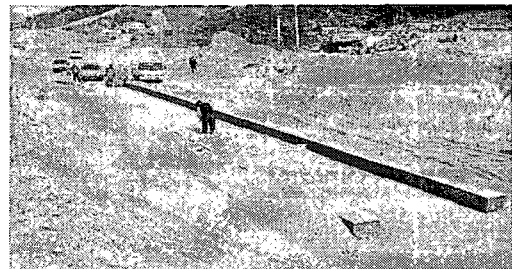
1. 현장답사



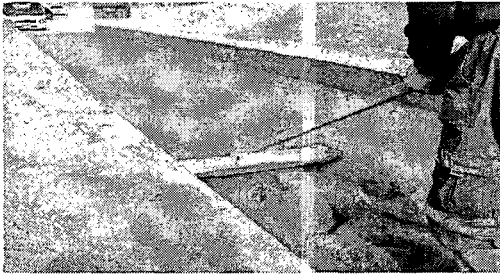
2. 노상다짐



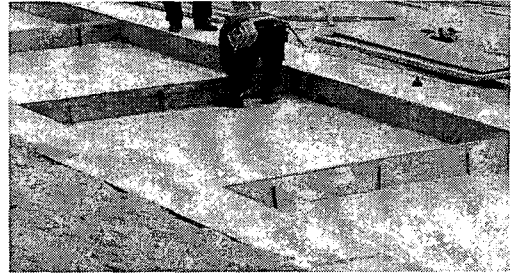
3. 동상방지층설치 및 평판재하실험



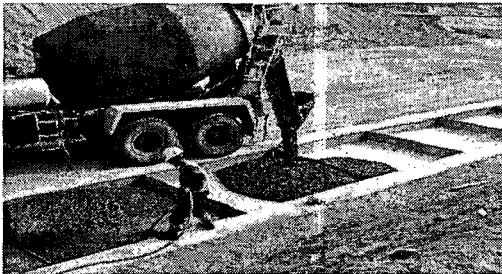
4. 파쇄장치 설치대 시공



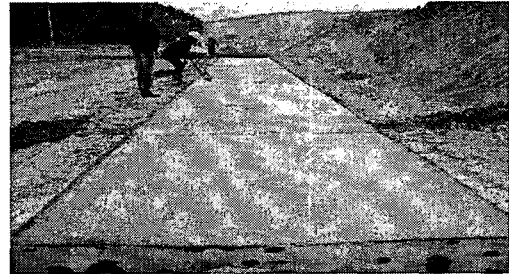
5. 린 콘크리트보조기층 타설



6. 불연속면 모사



7. 콘크리트포장 시공



8. 콘크리트포장 시공완료

그림 4.1 시험포장 시공 공정

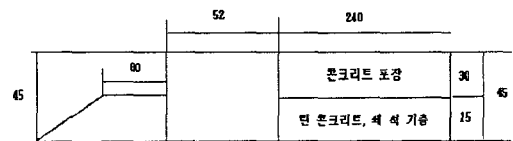
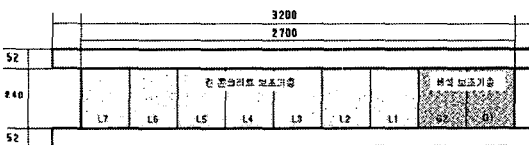


그림 4.2 시험도로 단면도

5. 시험포장 Section 별 파쇄결과 및 분석

각 Case 별 파쇄실험 결과는 표 5.1과 같다. 각각의 파쇄헤드 형상을 이용하였고 낙하높이를 0.9m에서 1.8m까지 적용하여 파쇄하중을 6ton에서 12ton까지 변화하여 최적의 파쇄하중을 판단하였으며, 파쇄헤드 간격을 조정으로 적정 입도로 콘크리트 포장면을 파쇄하는 파쇄용력을 검토 하였다, 안치방법으로써의 슬래브 다짐은 양측식 롤러와 일반 진동롤러를 사용하여 비교하였다. 그 결과 양측식 롤러로 다짐시 파쇄층을 과도하게 파쇄하는 경향을 보이는 반면, 일반 진동롤러는 일정한 규격을 유지하였다. 파쇄면에 대하여 2회 다짐 후 육안으로 관찰하여 적당하다고 판단되는 시험포장 6개의 슬래브에 대해 평판재하시험을 실시 한 결과, 양측식 롤러로 다짐한 L2-B Section 과 파쇄헤드 형상 TypeIII에 대한 L5 Section이 각각 36kg/cm<sup>2</sup> 과 48kg/cm<sup>2</sup>으로 측정되었다. 하지만 양측식 롤러로 다짐한 L2-B Section은 기층재료로 사용하기엔 미립분 성분이 많다고 판단된다. 파쇄헤드 TypeIII에 대한 L5 Section은 거의 파쇄되지 않아 콘크리트 슬래브의 지지력으로 판단된다.



표 5.1 파쇄실험 결과표

SECTION	파쇄 HEAD-SHAPE 및 간격	파쇄하중 (ton) / 파쇄용력 (kg/cm <sup>2</sup> )	파쇄깊이(Cm)				파쇄 골재 규격	헤드접촉면적/ 총단면적%
G1-A (진동롤러)		10 / 127	×				×	13.1
G1-B (진동롤러)		10 / 127	×				Cc: 1.424 Cu: 8.015	52.3
G1-C (진동롤러)		10 / 127	6.4 7.7 8.0	10 12 5.2	4 5.8 6.4	4.7 7.8 3.7	Cc: 2.326 Cu:14.363	20.1
G2 (진동롤러)		12 / 153	16.3 11.2 7.1	4.0 9.9 7.6	7.3 14 5.7	Cc: 1.161 Cu:10.031	13.1	
L1 (진동롤러)		12 / 153	8.6 11 7.6 7.2	7.4 7.5 8.7	7.5 8.8 9.1	Cc: 3.751 Cu:30.186	52.3	
L2-A (진동롤러)		10 / 127	12 9.4 8.5	7.6 8.0 9.9 6.7		Cc: 1.313 Cu:28.049	52.3	
L2-B 양축식롤러		10 / 127	9 8 9.3 8.3	7.1 9.7 8.0 7.7		Cc: 0.186 Cu: 29.185	13.1	
L3 (진동롤러)		12 / 80	5.5 6.7 7.5 8.9	7.2 8.1 5.9 6.6		Cc: 0.2 Cu:20.640	187.5	
L4 (진동롤러)		10 / 100	×				Cc: 2.288 Cu:29.767	8.9
L5 (진동롤러)		12 / 120	5.3 3.8 5.7 4.6	6.0 6.1 4.8 2.9	6.1 6.7 2.4 4.3	4.0 5.7 3.0 6.0	Cc: 1.370 Cu: 29.186	17.7



평판재하시험 후 다시 포장구조진단기를 통한 시험을 실시하였다. 표층 슬래브 타설후 포장구조진단기를 이용한 시험은 슬래브의 강성이 커짐에 따라 하중의 크기를 증가시켜 수행하였는데 16kips 와 25kips를 사용하여 처짐을 얻어냈다. 파쇄 골재층 경우 포장체의 탄성계수는 평균 40000psi 정도로 나타났다.

파쇄된 콘크리트 포장면은 RP(Rubblized PCC)와 FC(Fractured Concrete)로 구분된다. RP는 파쇄된 슬래브의 표층부로서 입도가 작은 골재들로 구성되어 있다. FC층은 그보다 큰 입도를 가지며 골재 맞물림을 통해 파쇄된 콘크리트 층의 구조적 일체성을 유지할 수 있다. 파쇄 깊이 측정을 위해 다짐이 끝난 파쇄층에 대해 RP층의 깊이 측정과 입도실험을 위한 시료채취를 병행하였다. 또한 FC 층 및 전체적인 파손정도 및 전체적인 파손정도를 알아보기 위해 백호를 이용하여 파쇄층을 제거하였다. 파쇄골재의 입도시험은 RP에 대하여 하였다.

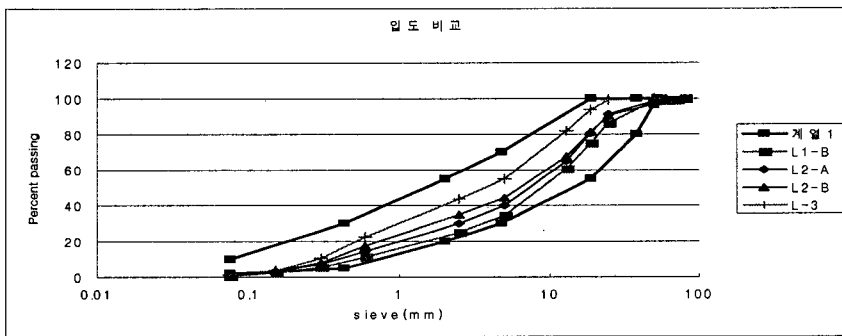


그림 5.1 SB-2와 입도 비교

그 결과, 평균입경은 59mm 정도였으며 최대 입경은 20cm정도로 국외의 시방기준을 만족하였다. 시험포장의 실험 입도와 보조기층재료로 사용한 SB-2의 입도를 그림 5.1과 같이 비교한 결과 L1-A, L2-B, L2-B, L3의 4개 Section이 입도 허용 범위에 만족 하였으며 파쇄깊이 또한 Rubblization PCC(RC)가 평균 9cm 정도였고, FC 역시 21cm로 실내 실험을 통하여 얻은 노면반사균열 억제를 위한 최소깊이 10cm와 비교하였을 때 큰 차이를 보이지 않았다. 시험도로에 대한 여러 실험값의 분석은 표만으로 분석이 어렵다고 판단되어 통계분석을 실시하였으며 본 실험의 목적인 포장면의 파쇄시 파쇄장비 헤드 형상과 파쇄간격을 정하기 위한 조건을 다음과 같이 선정하였다.

- 조건 1: 파쇄깊이는 10cm 접근.
- 조건 2: Variation은 적을수록 좋다.
- 조건 3: 파쇄골재 규격은  $Cu \geq 4, 1 < Cc < 3$ 의 범위를 갖는다.

데이터 분석을 위하여 통계기법은 One-Way-ANOVA(파쇄깊이)와 Main Effects Plot(파쇄골재규격)을 적용하였고 통계 Software는 Minitab을 사용하였다. 주어진 조건에 대한 최적의 Section을 선정한 후 선정된 Section에 대한 타당성을 위한 가설검증을 실시하였다. 그 결과, 조건 1을 만족시키는 Section은 L2-B, G2,L1, L2-A 이고, 조건 1과 2를 동시에 만족하는 Section은 L2-B, L2-A 이며, 조건 1,2,3 모두를 만족시키는 Section은 L2-A이다. 즉, 8개의 모든 Section 중 주어진 입력 조건에 가장 효율적인 파쇄 결과를 나타내는 Section은 L2-A임을 알 수 있다.

6. 결론

원위치 파쇄기층화 공법의 국내 적용을 위한 횡모드와 전단모드에 대한 반사균열 실내 모사실험결과 최소파쇄 적정 깊이는 10cm 이상임을 알게 되었으며, 이 결과를 바탕으로 실제 파쇄 실험과 실험 결과에 의한 데이터 분석을 통해 파쇄에너지 및 파쇄헤드 형상 타격 위치 등을 달리하여 파쇄된 골재에 대하여 지지력,



파쇄규격을 연구한 결과, 세 개의 Type의 파쇄 헤드 모형 가운데 원형 모양이 가장 적당한 규격의 파쇄골재를 얻었다. 이 때 시공 조건으로는 10ton의 하중으로 즉, 680kg의 헤드를 1.5m 높이에서 낙하시켰으며, 파쇄 응력은  $127\text{kg}/\text{cm}^2$ 으로 52.3%의 파쇄헤드 접지면적으로 하였다. 그 결과 평균 파쇄 깊이는 9.56cm로 10cm에 가장 근접하였으며, 입도분포 결과 역시 SB-2 허용 범위 안에 위치한다. 파쇄골재의 규격은  $C_c=1.313$   $C_u=28.049$ 로써 제시된 조건  $C_u \geq 4$ ,  $1 < C_c < 3$ 의 범위를 갖는다.

#### 감사의 글

본 연구는 건설교통부 핵심사업의 일환인 노후 콘크리트 포장의 원위치 파쇄 기층화 공법 개발과제의 일부 성과물입니다.

#### 참고 문헌

1. 한국건설기술연구원, 하국형포장설계법 개발과 포장성능 개선방안연구, 2002.10
2. Huffman. J. E, "Reflection Cracking and control methods" Proc. CTAA, Vol 23
3. Khaled Ksaibati, Miley, Willian, "Rubblozation of Concrete Pavement" 77th An nu Meeting, Transportation Research Board.
4. Khaled A, Brian J., John E., Thmas D. 1998 "Structural Adepuacy of Rubblized PCC Pavement"