



재활용 도로재료의 회복탄성계수 산정을 위한 적용 모델의 평가

Evaluation of Resilient Modulus Models for Recycled Materials

손영환^{*,†}

Son, Young Hwan^{*,†}

ABSTRACT

Many models have been used to represent the effects of confining stress, bulk stress, and shear stress on the value of the resilient modulus (M_r). This study was conducted to estimate M_r of the recycled materials such as recycled concrete aggregate (RCA) and recycled asphalt pavement (RAP) through the repeated load cyclic test. Also, two models were applied to estimation of M_r for comparing between measured M_r values and predicted M_r values. The first model (A-model) can provide a quick and easy estimation of the M_r based on the bulk stress, while the second model (N-model) includes not only the bulk stress but also the shear stress. Statistical analysis indicated that all results using the both of models are significant at a 95 % confidence level. Therefore, the both of models could be used as an effective prediction model of M_r for RCA and RAP. Especially, the Model 2 including the parameters of the bulk stress and the shear stress could give more reliable estimation at the high range of M_r values.

Keywords: Recycled concrete aggregate; Recycled asphalt pavement; Bulk stress; Shear stress; Resilient modulus

1. 서 론

도로는 물류의 수송과 사람의 이동을 도와주는 주된 교통시설일 뿐 아니라 국가의 기간시설이라고 할 수 있다. 도로포장은 이러한 목적에 부합하고 이용자의 요구를 충족시키기 위하여 설계, 시공, 유지·관리 등 모든 부분에서 발전하여 왔으며, 특히 이용자의 문화수준과 주변 환경 등을 반영하여 꾸준히 변화하고 있다. 그러나 최근 급속한 산업 발전에 따른 도로의 수요 증가, 급격한 교통량과 대형차량의 증가로 인한 도로의 파손도 급증하고 있다. 이러한 도로의 수요에 대한 새로운 도로건설과 파손으로 인한 기존도로의 보수를 충족시키기 위해서는 골재와 같은 많은 자연자원이 필요하며, 이로 인한 자연의 훼손은 필연적인 결과가 될 것이다. 또한 자원의 고갈로 인한 원가상승의 유발은 경제적인 부담을 가중시킬 것이다. 즉, 천연자원의 보존과 손실을 최소화하기 위한 연구가 필요하며, 기존 도로에서 발생하는 재료의 재활용은 이러한 목적에 부합할

것이다. 국내에서도 여러 연구자들이 이러한 목적에 부합하기 위하여 재생골재, 산업부산물, 폐비닐, 석탄폐석을 이용하여 콘크리트의 재료로 사용하거나 새로운 건설재료를 개발하는데 적용한 바 있다 (Kim et al., 2001; Kim et al., 2002; Sung and Ryu, 2004; Sung and Back, 2005).

도로포장은 대표적으로 콘크리트와 아스팔트 포장으로 분류할 수 있으며, 이를 고려하여 본 연구에서는 RCA (Recycled Concrete Aggregate)와 RAP (Recycled Asphalt Pavement)를 이용하여 회복탄성계수를 구하고, 이를 구하기 위하여 제안된 모델의 적용성을 평가하였다. 한편, 근래에 들어 이러한 재료를 도로에 재사용하기 위한 연구가 많이 진행되고 있다 (Bennert et al., 2000; Nataatmadja and Tan, 2001; Kuo et al., 2002; Blankenagel and Guthrie, 2006; Guthrie et al., 2007). 도로에서 발생하는 재활용 재료는 일반적으로 현장에서 바로 재활용이 가능하며, 시간 및 경제성 측면에서 많은 이득이 있다고 하였다 (Bennert et al., 2000).

한편, 도로에 시공되는 기층이나 보조기층 등의 설계와 평가에는 많은 조건들이 고려된다. 그러나 회복탄성계수 (Resilient Modulus, M_r)는 포장체의 역학적 거동특성을 가장 합리적으로 반영하는 재료의 특성치로 평가되고 있어 도로설계시 중요한 변수로 사용되고 있다. 회복탄성계수는 반복하중의 과정을 통해 소성이 제거된 상태에서의 축차응력과 회복변형률의 비로

* 위스콘신주립대학교 토목·환경공학과 연구원

† Corresponding author. Tel.: +1-608-265-4454

Fax: +1-608-890-1174

E-mail address: yson3@wisc.edu

2010년 2월 19일 투고

2010년 3월 16일 심사완료

2010년 3월 17일 게재확정

정의되며 (May and Witczak, 1981; Uzan, 1985), 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (1)$$

여기서, σ_d ; deviatoric stress, ϵ_r ; recoverable axial strain

M_r 의 예측모델은 주로 응력의 함수로 표현되고 개발되어 왔다. 이는 M_r 이 축차응력, 구속응력 또는 체적응력의 크기에 따라 변화하기 때문이다. 그러므로 노상토와 보조기층은 응력의 영향에 따라 적합한 모델을 적용하게 된다. 응력의 영향은 축차응력과 구속응력의 상호작용으로 나타나므로 이를 체적응력을 이용한 모델로 표현하고 있다 (Rada and Witczak, 1981). 또한, Barksdale (1972)는 입상재료는 체적응력이 증가할수록 회복탄성계수가 증가한다고 하였으며, 많은 연구자들이 응력과 재료적 요인 등을 고려한 여러 가지 모델을 제시하고 있다 (May and Witczak, 1981; Uzan, 1985; Kweon et al., 1999). 본 연구에서는 국내에서 Kweon (1999)에 의해 검증받은 바 있으며, 여러 연구자 (Biarez, 1962; Hicks and Monismith, 1971)와 AASHTO (1994)에서 제안한 식 (2)의 체적응력모델을 적용하였다.

$$M_r = k_1 \cdot \theta^{k_2} \quad (2)$$

여기서, θ ; bulk stress ($\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$),
 k_1, k_2 ; regression constants

또한, NCHRP (2004)에서 제안한 식 (3)을 적용하여 M_r 을 구하고 식 (2)를 이용해서 구한 M_r 값과 비교하고 적용성을 평가하였다. 식 (3)은 체적응력과 전단응력을 고려한 모델이라고 할 수 있다.

$$M_r = k_1 \cdot p_a \cdot \left[\frac{\theta - 3k_6}{p_a} \right]^{k_2} \cdot \left[\frac{\tau_{oct}}{p_a} + k_7 \right]^{k_3} \quad (3)$$

여기서, θ ; bulk stress ($\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$)
 τ_{oct} ; octahedral shear stress

$$\left(\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} \right)$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$; principal stresses
 k_i ; regression constants

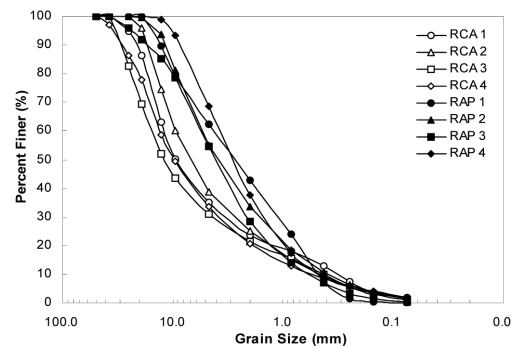
($k_1, k_2 \geq 0, k_3, k_6 \geq 0, k_7 \geq 1$)
 p_a ; atmospheric pressure (14.7 psi)

본 연구에서는 상기 두 모델을 이용하여 RCA와 RAP의 회복탄성계수를 구하였다. 그리고 각각의 모델을 적용하여 구한 M_r 의 예측값과 실험에서 직접 구해진 실측값을 비교하여 적용성을 평가하였다.

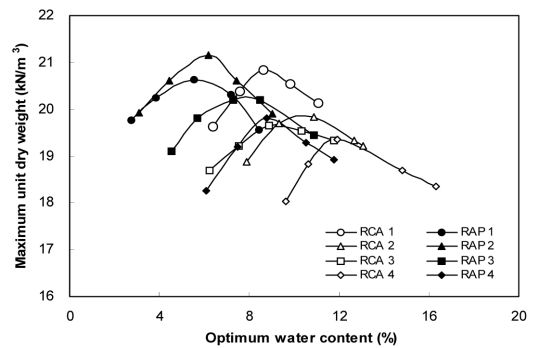
Table 1 Physical properties of materials

Sample	W_{opt} (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)	% Gravel	% Sand	% Fines	USCS	LL (%)	PL (%)
RCA 1	8.7	20.8	64.9	33.3	1.86	GP	N.P.	N.P.
RCA 2	10.4	19.9	61.1	37.4	1.53	GW		
RCA 3	9.2	19.7	69.2	29.7	1.14	GP		
RCA 4	11.8	19.4	63.5	31.9	1.82	GW		
RAP 1	5.7	20.7	37.8	62.2	0.08	SP	N.P.	N.P.
RAP 2	6.2	21.2	45.2	53.1	1.70	SW		
RAP 3	8.0	20.3	26.8	72.8	0.43	SW		
RAP 4	8.8	19.8	31.2	67.1	1.72	SW		

W_{opt} ; optimum water content, γ_{dmax} ; maximum dry unit weight, LL; liquid limit, PL; plastic limit, N.P.; non-plastic.



(a)



(b)

Fig. 1 Particle size distribution and compaction curves for RCA and RAP

Table 2 Results of compaction test

Sample	Optimum water content W_{opt} (%)					Maximum dry unit weight γ_{dmax} (kN/m ³)				
	value	avg ¹	std ²	cov ³	range	value	avg	std	cov	range
RCA 1	8.7	10.0	1.38	14%	3.1	20.84	19.9	0.64	3%	1.48
RCA 2	10.4					19.87				
RCA 3	9.2					19.66				
RCA 4	11.8					19.36				
RAP 1	5.7	7.2	1.47	20%	3.1	20.65	20.5	0.57	3%	1.34
RAP 2	8.0					20.28				
RAP 3	6.2					21.16				
RAP 4	8.8					19.82				

avg¹; average, std²; standard deviation, cov³; coefficient of variance

II. 재료 및 실험방법

1. 재료

본 연구에는 각각 4종류의 RCA와 RAP을 사용하였으며 이들 재료의 물리적 특성은 Table 1과 같다.

주어진 RCA와 RAP를 이용하여 입도시험과 다짐시험을 실시하였으며, 이에 대한 결과는 Fig. 1에 도시하였다. 또한, 다짐시험의 결과는 Table 2에 정리하였다.

입도시험 결과, RCA는 GW와 GP로 분류되었으며, RAP는 SW와 SP로 분류되었다. 그리고 RCA의 D₅₀, D₆₀의 입경은 RAP 보다 큰 것으로 확인되었다.

한편, RCA의 최적함수비는 8.7~11.8 %, 최대건조단위중량은 19.36~20.84 kN/m³의 범위에서, RAP의 최적함수비는 5.7~8.8 %, 최대건조단위중량은 19.82~21.16 kN/m³의 범위에서 분포하고 있는 것으로 나타났다. 두 시료의 결과 값은 비슷한 range를 보이고 있으나, RAP는 RCA에 비해 상대적으로 높은 최대건조단위중량과 낮은 최적함수비의 경향을 보였다. 이러한 경향은 RAP에 함유되어 있는 아스팔트 성분의 영향으로 판단된다. 즉, 유제 성분이 입자나 골재를 코팅하는 효과에 의해 최적함수비는 감소하며, 상대적으로 큰 점성으로 인해 입자간 공극을 채울 수 있는 능력과 부착능력의 향상에 의해 나타나는 결과로 판단된다.

2. 실험방법

Mr 시험을 위한 시료를 성형하기 위한 조건은 다짐시험에 의하여 결정되었다. 다짐시험은 ASTM D 1557-02에 따라 실시되었으며, 실험에서 구한 최대건조단위중량과 최적함수비가 적용되었다. Mr 시험을 위한 시료는 지름 152 mm, 높이 305 mm이며, 분리가 가능한 몰드를 사용하여 시료추출에 따른 교

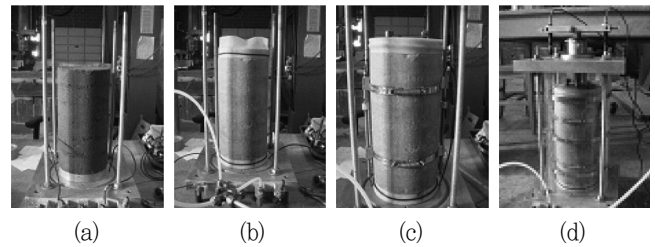


Fig. 2 Specimen and testing equipments for resilient modulus

란의 영향을 최소화 하였다. 준비된 시료는 cell로 옮겨지게 되며 (Fig. 2(a)), 이후 멤브레인을 씌우고 고무링을 이용하여 상·하부의 plate에 Fig. 2(b)와 같이 밀착시킨다. Mr 시험은 NCHRP 1-28A (NCHRP 2004)의 Procedure 1a에 따라 실시하였으며, 반복하중은 MTS system (Model 244.12 servo-hydraulic machine)을 이용하였다. 이때 0.1초간의 하중재하와 0.9초간의 휴지시간을 갖는 일정한 주기의 축차응력을 적용하여 변형률 응답을 얻게 된다.

변형을 측정하기 위한 LVDT (linear variable differential transducers)는 cell의 내부와 외부에 각 2개씩 설치하였다. 내부 LVDT (Fig. 2(c))는 cell 내부의 시료에 직접 설치하였으며, 외부 LVDT (Fig. 2(d))는 상부의 top plate에 설치하였다. Mr을 구하기 위한 본 시험에 앞서 예비시험이 실시되며, 103.5 kPa의 구속압에서 1000 cycle의 반복하중이 주어진다. 이때 수직변형이 5 % 이상 발생하게 되면 시험은 자동으로 멈추게 되며, 그렇지 않으면 자동적으로 본 시험을 실시하게 된다. 본 시험은 20.7, 41.4, 69.0, 103.5, 138.0 kPa의 구속압에서 실시되며, 이러한 과정을 6번 반복하여 총 30번의 단계가 적용된다. 각 단계에서 100 cycle의 반복하중이 주어지며, 마지막 5번의 cycle에서 구해진 값을 평균하여 각 하중단계에서의 Mr 값을 구하게 된다. 본 연구에서 구해진 Mr 값은 체적응력이 208 kPa인 경우를 기준으로 하였는데, 이는 NCHRP에서는 $\sigma_d = 103$ kPa, $\sigma_3 = 35$ kPa일 때의 Mr값을 계산하는 것을 제시하고 있기 때문이다 (NCHRP 2004). 이때, 체적응력 (θ)은 $\sigma_d + 3 \cdot \sigma_3$ 와 같이 표현할 수 있다.

III. 결과 및 고찰

1. 적용모델별 회복탄성계수

식 (2), 식 (3)의 모델은 AASHTO와 NCHRP에서 제안한 모델이므로 각각 A-model과 N-model로 명기하였고, 두 모델을 적용하여 각 재료별 회복탄성계수 (Mr)을 구하였다. Mr은 내부 (internal)와 외부 (external)의 LVDT에서 측정된 값을 이용하여 각각 구하였으며, 결과는 Table 3에 정리하였다. 또한,

이들의 관계를 Fig. 3에 도시하였다.

Table 3의 결과와 같이 A-model을 적용해서 구한 Mr 값이 N-model을 적용해서 구한 Mr 값보다 약간 크게 나타났다. 또한, RAP의 Mr 값이 RCA의 Mr 값에 비해 상대적으로 약간 크게 나타났다. 이러한 결과로 미루어 동일한 축차응력의 조건에서 RAP의 회복변형률은 RCA에 비해 상대적으로 작은 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 3과 같이 외부 (external) LVDT와 내부 (internal) LVDT에서 측정된 결과를 이용해서 구한 Mr 값은 일정한 비율을 가지는 것으로 확인되었다. 즉, 내부 LVDT의 측정값을 이용해서 구한 Mr 값 (M_{INT})은 외부 LVDT의 측정값을 이용해서 구한 Mr 값 (M_{EXT})보다 약 3.6배 정도 크게 나타났다. 이들의 관계는 식 (4)와 같이 표현할 수 있다. 이러한 측정값의 차이는 동일한 축차응력이 주어지더라도 시료전체에 걸쳐 변형률이 동일하게 발생하지 않기 때문에 생기는 것으로 판단된다. 즉, 외부 LVDT는 시료 전체 길이인 12 inch에 대한 변형을 반영하고, 내부 LVDT는 시료의 상부와 하부에서 시료 전체 길이의 각 1/4 떨어진 지점의 중간부분 6 inch에 대한 변형을 반영한

다. 그러므로 시료의 중앙부분에서 발생하는 변형은 시료 전체 길이에서 발생하는 변형에 비해 상대적으로 작다고 판단할 수 있다.

$$M_{INT}(MPa)=3.6 \cdot M_{EXT}(MPa) \quad (4)$$

각 모델별로 구한 계수들은 Table 4에 정리하였다.

Table 3 Resilient modulus of external and internal for RCA and RAP

Sample	A-model		N-model	
	External	Internal	External	Internal
RCA 1	171.1	714.5	170.8	714.8
RCA 2	178.0	627.3	165.6	563.5
RCA 3	164.2	548.5	150.6	489.5
RCA 4	162.9	553.9	157.6	522.3
RAP 1	184.2	672.6	177.4	629.3
RAP 2	173.2	626.7	165.5	588.9
RAP 3	197.9	776.3	188.3	779.4
RAP 4	196.9	699.4	192.2	673.6

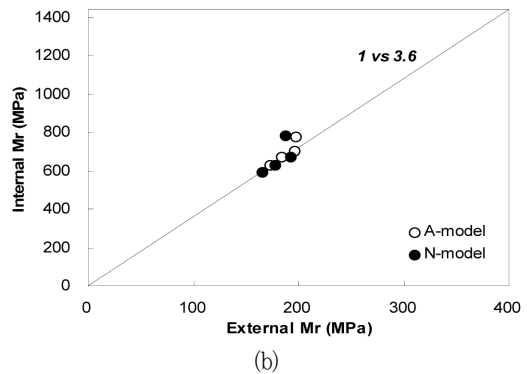
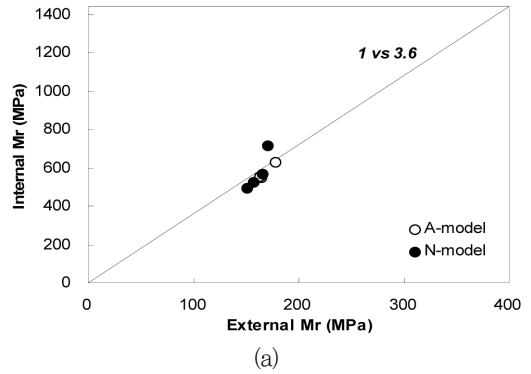


Fig. 3 Relationship between external Mr and internal Mr for RCA and RAP using A-model & N-model ; (a) RCA, (b) RAP

Table 4 Coefficients of A-model (k_1, k_2) and N-model (k_1, k_2, k_3, k_6, k_7) for RCA and RAP

Sample	External							Internal						
	A-model		N-model					A-model		N-model				
	k_1	k_2	k_1	k_2	k_3	k_6	k_7	k_1	k_2	k_1	k_2	k_3	k_6	k_7
RCA	14.3	0.465	2121.5	0.803	-1.006	-0.288	1.771	40.7	0.537	9200.6	0.802	-0.916	-0.478	2.059
	15.2	0.461	2198.9	0.863	-1.188	-0.253	1.685	33.0	0.539	8023.1	1.029	-1.398	-0.319	1.732
	9.1	0.542	2044.3	0.936	-1.200	-0.415	1.811	17.6	0.644	6178.9	1.457	-1.700	-31.10	2.337
	12.6	0.479	1971.4	0.742	-0.843	-0.105	2.116	27.7	0.561	6819.3	0.855	-0.932	-0.516	2.556
RAP	25.6	0.370	2093.2	0.643	-0.910	-0.199	1.537	75.0	0.411	7719.8	0.713	-0.998	-0.243	1.593
	12.3	0.495	2042.5	0.814	-0.995	-0.264	1.776	36.4	0.533	7934.8	0.950	-1.209	-0.295	1.801
	21.6	0.415	1749.4	0.651	-0.671	-11.88	1.287	52.4	0.525	8450.7	0.537	-0.195	0.000	13.396
	15.6	0.475	2368.1	0.786	-1.008	-0.214	1.709	42.7	0.524	8726.8	0.909	-1.220	-0.338	1.663

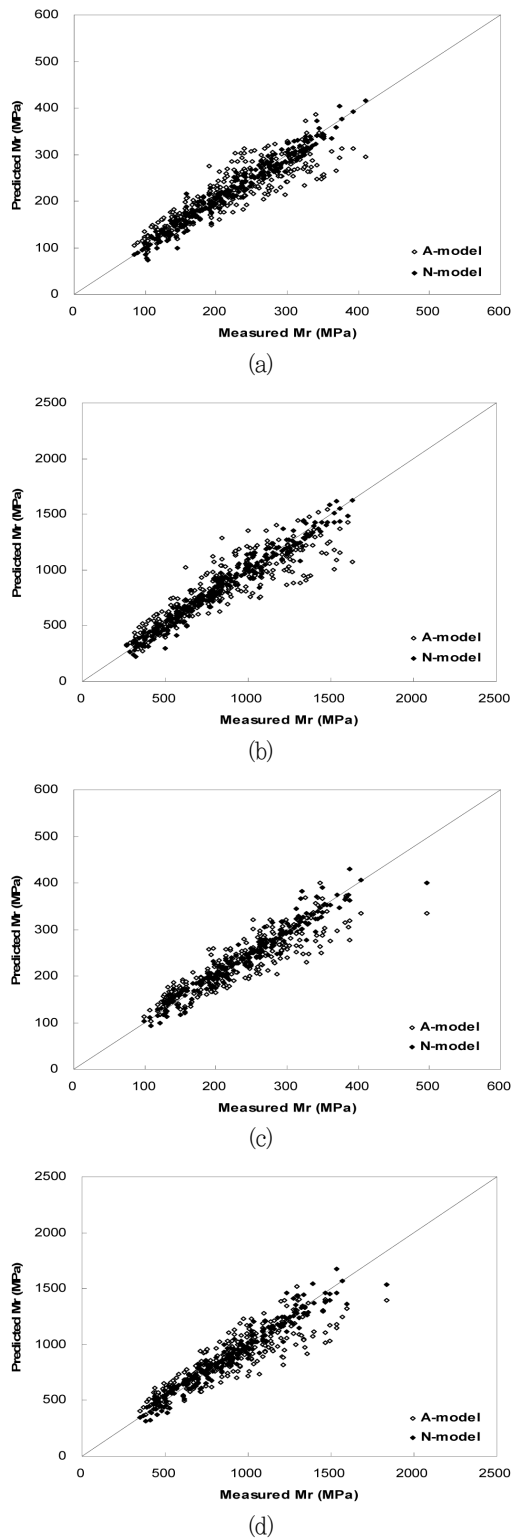


Fig. 4 Relationship between measured Mr and predicted Mr for RCA and RAP using A-model & N-model ; (a) External Mr (RCA), (b) Internal Mr (RCA), (c) External Mr (RAP), (d) Internal Mr (RAP)

Table 5 Regression analysis for RCA and RAP

Sample	A-model				N-model			
	External		Internal		External		Internal	
	t-statistic	R ²	t-statistic	R ²	t-statistic	R ²	t-statistic	R ²
RCA	28.6	0.75	30.4	0.78	81.8	0.96	83.1	0.96
RAP	28.5	0.78	27.4	0.76	63.1	0.94	66.6	0.95

2. 적용모델의 평가

두 가지 모델에 대한 적용성을 시료별로 확인하였다. 실험에서 구해진 실측값과 각 모델을 적용하여 구한 예측값을 비교하여 Fig. 4에 도시하였다.

Fig. 4는 실험에 적용된 4종류의 시료에 대한 Mr 시험에서 각 하중단계에서 구해진 Mr 값들을 모두 도시한 것이다. RCA는 각 하중단계에서 얻어진 Mr 값이 236개이며, RAP의 경우는 268개의 Mr 값이 적용되었다.

A-model을 적용했을 경우 상대적으로 높은 Mr 값의 범위-External Mr의 측정값은 약 250 MPa 이상, Internal Mr의 측정값은 약 1000 MPa 이상-에서 실측값보다 예측값이 작게 구해졌으나, N-model을 적용해서 구한 Mr 값은 A-model의 경우보다 전체적으로 측정값과 예측값의 차이가 작은 것으로 나타났다. 이러한 경향은 N-model은 체적응력과 전단응력을 동시에 고려하여 Mr 값을 구하게 되므로, 높은 Mr 값의 범위에서도 실측값과 예측값의 차이가 상대적으로 작게 나타나는 것으로 판단된다. 또한, Fig. 4에서 알 수 있듯이 RCA, RAP의 Mr 값을 구하기 위해 사용한 두 모델 중 N-model의 적용성이 더 좋은 것으로 판단되며, 이에 대한 평가를 보다 명확하게 하기 위해서 회귀분석을 실시하였다. 실시 결과에서 t-statistics는 28.5~83.1로 구해졌으며, 이는 신뢰수준 95 %에서 통계적으로 유의함을 의미한다. 또한, 두 모델의 상관계수는 0.75~0.96의 값으로 구해졌다. 이에 대한 결과는 Table 5에 정리하였다. 결과적으로 RCA와 RAP의 Mr 값을 구하기 위해 적용해 본 두 모델인 A-model과 N-model은 실측치와 예측치에서 좋은 상관성을 보였으나, 상대적으로 높은 Mr 값의 범위에서는 N-model을 적용하는 것이 A-model에 비해 보다 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

IV. 요약 및 결론

재활용 재료인 RCA와 RAP를 이용하여 회복탄성계수 (Mr)를 구하였으며, AASHTO (A-model)와 NCHRP (N-model)에서 제안하는 두 가지 모델을 이용하여 적용성을 검토하였다. 이로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. A-model을 적용해서 구한 Mr 값이 N-model을 적용해

서 구한 Mr 값보다 약간 크게 구해졌다. 또한, RAP의 Mr 값이 RCA의 Mr 값에 비해 상대적으로 약간 크게 나타났다. 즉, 동일한 축차응력의 조건에서 RAP의 회복변형률은 RCA에 비해 상대적으로 작다는 것을 알 수 있다.

2. 내부 (internal) Mr 값 (M_{INT})은 외부 (external) Mr 값 (M_{EXT})보다 약 3.6배 정도 크게 나타났으며, $M_{INT}=3.6 \cdot M_{EXT}$ 와 같이 표현할 수 있었다. 이러한 현상은 동일한 축차응력에 대한 변형률이 시료의 위치별로 동일하지 않기 때문에 생기는 것으로 판단된다. 즉, 외부 LVDT는 실험에 사용된 시료의 전체 길이에 대한 변형을 반영하고, 내부 LVDT는 시료의 중간 부분에 대한 변형을 반영한다. 그러므로 시료의 중간부분에서의 변형은 시료의 전체 길이에 대한 변형에 비해 상대적으로 작게 발생한다고 판단할 수 있다.

3. 상대적으로 높은 Mr 값의 범위에서는 N-model을 적용해서 구한 Mr 값이 A-model을 적용해서 구한 경우보다 측정값과 예측값의 차이가 작은 것으로 나타났다. 이는 N-model이 체적응력과 전단응력을 동시에 고려하여 Mr 값을 구하기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 두 모델의 적용성에 대한 평가를 하기 위해 실시한 회귀분석 결과, t-statistics는 28.5~83.1로 구해져 신뢰수준 95 %에서 통계적으로 유의하였고, 상관계수도 0.75~0.96의 값으로 구해져 A-model과 N-model은 모두 만족할만한 상관성을 보였다.

REFERENCES

1. AASHTO, 1994. Standard method of test for resilient modulus of unbound granular base/subbase materials and subgrade soils-SHRP protocol P.46. AASHTO designation T294-94, Washington D. C.
2. Barksdale, R. D. 1972. Repeated loading testing evaluation of base course materials. GHD Research Project 7002, Final Report. FHWA, U. S. Department of Transportation.
3. Bennert, T., W. J. Papp Jr, A. Maher, and N. Gucunski, 2000. Utilization of construction and demolition debris under traffic-type loading in base and subbase applications. *Transportation Research Record* 1714: 33-39.
4. Biarez, J., 1962. Contribution a l'Etude des propriétés mécaniques des sols et des matériaux pulvérulents, D.Sc. Thesis, University of Grenoble.
5. Blankenagel, B. J. and W. S. Guthrie, 2006. Laboratory characterization of recycled concrete for use as pavement base material. *Geomaterials* 1952: 21-27.
6. Guthrie, W. S., D. Cooley, and D. L. Eggett, 2007. Effects of reclaimed asphalt pavement on mechanical properties of base materials. *Transportation Research Record* 2006: 44-52.
7. Hicks, R. G., and C. L. Monismith, 1971. Factors influencing the resilient properties of granular material. *Transportation Research Record*. 345. TRB, Washington D. C.: 15-31.
8. Kim, K. W., Y. S. Doh, and X. F. Li, 2001. Evaluation for characteristics of coal-mine waste concrete. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 43(2): 132-139 (in Korean).
9. Kim, K. W., J. I. Kim, S. J. Lee, and S. J. Kim, 2002. Experimental study for determination of optimum waste vinyl contents in asphalt concrete. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 44(5): 88-95 (in Korean).
10. Kuo S. S., H. S. Mahgoub, and A. Nazef, 2002. Investigation of recycled concrete made with limestone aggregate for a base course in flexible pavement. *Geomaterials* 1787: 99-108.
11. Kweon, G. C., 1999. Alternative Mr testing methods for subgrade and subbase materials considering deformational characteristics of soils. Ph.D. Thesis, *Korea Advanced Institute of Science and Technology* (in Korean).
12. Kweon, G., D. Kim, and M. Song, 1999. Stiffness characteristics of subgrade and subbase materials in Korea. *KSCE Proceeding*: 133-136 (in Korean).
13. May, R. W., and M. W. Witczak, 1981. Effective granular modulus to model pavement responses, Layered Pavement Systems, *Transportation Research Record* 810: 1-9.
14. Nataatmadja, A. and Y. L. Tan, 2001. Resilient response of concrete road aggregates. *Journal of Transportation Engineering* 127(5): 450-453.
15. NCHRP, 2004. Laboratory determination of resilient modulus for flexible pavement design. *National Cooperative Highway Research Program Research Results Digest* 285: 1-48.
16. Rada, G. and M. W. Witczak, 1981. Comprehensive evaluation of laboratory resilient moduli results for

- granular material layered pavement system. *Transportation Research Record* 810. TRB, National Research Council, Washington, D. C.: 471-493
17. Sung, C. Y., and N. H. Ryu, 2004. Characteristics of recycled concrete using recycled coarse aggregate and industrial by-products. *Journal of Advanced Mineral Aggregate Composites* 9:125-132. (in Korean)
 18. Sung, C. Y., and S. C. Back, 2005. Physical and mechanical properties of polymer concrete using recycled aggregate. *Journal of Agri. Sci.* Chungnam National University, Korea 32(1): 19-27 (in Korean).
 19. Uzan, J., 1985. Characterization of granular material, analysis and testing of granular base and subbase, *Transportation Research Record* 1022: 1-9.