

碩士學位論文

새로운 매설형 신축이음장치의  
차량 하중에 대한 내구성 평가

The background features a large, faint watermark of the Jeju National University logo. The logo is circular, containing a stylized flame or leaf design in blue, green, and purple. The text 'JEJU NATIONAL UNIVERSITY 1952' is written around the perimeter, and 'JEJU 1952' is in the center. Below the logo, the Korean text '제주대학교' is visible.

濟州大學校 大學院

土木海洋工學科

左 容 賢

2010年 2月

# 새로운 매설형 신축이음장치의 차량 하중에 대한 내구성 평가

指導教授 朴 相 烈

左 容 賢

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2010年 2月

左容賢의 工學 碩士學位 論文으로 認准함

審査委員長 \_\_\_\_\_ 印

委 員 \_\_\_\_\_ 印

委 員 \_\_\_\_\_ 印

濟州大學校 大學院

2010年 2月

# Durability Evaluation of New Buried Expansion Joint System about Vehicle Load

Yong-Hyun Jwa  
(Supervised by Professor Sang-Yeol Park)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for  
the degree of Master of Engineering

2010. 2

This thesis has been examined and approved by

Thesis director, Sang-Jin Kim, Prof. of Civil & Ocean Engineering

Thesis director, Sang-Yeol Park, Prof. of Civil & Ocean Engineering

Thesis director, Dong Wook Lee, Prof. of Civil & Ocean Engineering

*February 2010.*

Department of Civil & Ocean Engineering

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

# 목 차

목 차 .....	i
LIST OF TABLES .....	iv
LIST OF FIGURES .....	v
ABSTRACT .....	viii
<b>I. 서론 .....</b>	<b>1</b>
1. 연구배경 및 목적 .....	1
2. 연구 범위 및 방법 .....	2
<b>II. 신축이음장치 적용 현황 .....</b>	<b>4</b>
1. 국내 신축이음장치 현황 .....	4
1) Mono Cell 조인트 .....	6
2) NB(ACE)조인트 .....	6
3) Transflex 조인트 .....	7
2. 국외 매설형 신축이음장치 현황 .....	8
3. 적용 현황 분석 .....	10
<b>III. 기존 연구 고찰 .....</b>	<b>13</b>
1. 개요 .....	13
2. 매설형 신축이음장치 BFLJ system의 개발 .....	13
1) 기존 매설형 신축이음장치(APJ system) 시험 .....	14
2) 개발된 매설형 신축이음장치(BFLJ system) 시험 .....	15
3. 매설형 신축이음장치의 유한요소해석 .....	16
1) 기존 매설형 신축이음장치(APJ system)의 유한요소해석 .....	17
2) 개발된 매설형 신축이음장치(BFLJ system)의 유한요소해석 .....	21

<b>IV. 실험 계획</b> .....	<b>24</b>
1. 실험개요 .....	24
2. 매설형 신축이음장치 구성요소 및 사용재료 .....	24
1) 하부 시스템 .....	24
2) 상부 포장 혼합물 .....	26
3. 휠트래킹 실험(Wheel Tracking Test) .....	31
1) 실험 개요 .....	31
2) 시험체 제작 및 시험방법 .....	33
4. 고온(35℃)에서의 신축시험 .....	35
1) 실험변수 .....	35
2) 시험체 제원 및 제작 .....	36
3) 신축량 산정 및 변위 재하속도 결정 .....	42
4) 실험 방법 .....	45
5. 윤하중 실험 .....	47
1) 실험 개요 .....	47
2) 실험 변수 .....	48
3) 시험체 제원 및 제작 .....	49
4) 실험 방법 및 Data 측정 .....	53
<b>V. 실험 및 결과 분석</b> .....	<b>55</b>
1. 휠트래킹 실험 결과 및 분석 .....	55
2. 고온(35℃)에서의 신축시험 결과 및 분석 .....	59
1) 기존 매설형 신축이음장치(APJs)의 온도에 따른 실험 결과 및 분석 .....	59
2) 기존 매설형 신축이음장치의 상부 포장재료에 따른 실험 결과 및 분석 .....	60
3) 개발된 매설형 신축이음장치(BFLJs)의 온도에 따른 실험 결과 및 분석 .....	62
4) 개발된 매설형 신축이음장치의 상부 포장재료에 따른 실험 결과 및 분석 .....	63
5) 고온에서의 신축시험 결과 .....	65
3. 윤하중 시험 결과 및 분석 .....	66

1) 기존 매설형 신축이음장치 APJ0 시험체 .....	66
2) 개발된 매설형 신축이음장치 BFLJ0 시험체 .....	68
3) BFLJ1 시험체 - 스테드 높이 45mm .....	69
4) BFLJ2 시험체 - 상부 포장재료 Techcrete .....	71
5) BFLJ3 시험체 - 겹 폭 85mm .....	73
6) BFLJ4 시험체 .....	75
7) 윤하중 실험 결과 .....	76
<b>VI. 결 론</b> .....	<b>78</b>
<b>VII. 참고문헌</b> .....	<b>80</b>



## LIST OF TABLES

Table 2.1 Allowable expansion length of expansion joints (mm) .....	5
Table 4.1 Components of folding lattice system .....	26
Table 4.2 Grading of aggregate (KS F 2357) .....	28
Table 4.3 Suggested grading of aggregate .....	28
Table 4.4 Properties of Superphalt and I-phlat .....	29
Table 4.5 Properties of Sealant .....	30
Table 4.6 Properties of Techcrete .....	30
Table 4.7 Test parameters of APJ system .....	36
Table 4.8 Test parameters of BFLJ system .....	36
Table 4.9 Mixture proportion of asphalt concrete .....	38
Table. 4.10 Mixture proportion of joint .....	40
Table 4.11 Design expansion length (도로 설계요령 6.2.3) .....	43
Table 4.12 Performance of KALES .....	48
Table 4.13 Test parameters of APJ system .....	49
Table 4.14 Test parameters of BFLJ system .....	49
Table 5.1 Results of Wheel Tracking Test .....	55

## LIST OF FIGURES

Fig. 2.1 A list of expansion joints .....	4
Fig. 2.2 Mono Cell joint .....	6
Fig. 2.3 NB(ACE) joint .....	7
Fig. 2.4 Transflex joint .....	7
Fig. 2.5 Schematic sketch of Asphalt Plug Joint .....	8
Fig. 2.6 Typical distress types with APJ (Partl et al., 2002) .....	9
Fig. 2.7 Usage of APJs (Bramel et al., 1999) .....	9
Fig. 2.8 Domestic installed condition of the expansion joint .....	10
Fig. 3.1 BFLJ(Buried Folding Lattice Joint) system .....	14
Fig. 3.2 Surface strain of APJ system .....	15
Fig. 3.3 Surface strain of BFLJ system .....	16
Fig. 3.4 Schematic of standard APJ system (Reid et al., 1998) .....	17
Fig. 3.5 Optimized joint geometry proposed by Bramel et al. (1999) .....	18
Fig. 3.6 Proposed alternative APJs (Reid et al. 1998) .....	18
Fig. 3.7 Suggested optimum APJ design .....	20
Fig. 3.8 Comparison of FEM vs. experiment surface strain of APJ system ..	22
Fig. 3.9 Comparison of FEM vs. experiment surface strain of BFLJ system	22
Fig. 3.10 Contours of maximum principal strain : APJ system .....	23
Fig. 3.11 Contours of maximum principal strain : BFLJ system .....	23
Fig. 4.1 Substructure of buried expansion joint system .....	25
Fig. 4.2 Component and dimension of folding lattice system .....	26
Fig. 4.3 Bituminous mixture of joint .....	27
Fig. 4.4 Manufacture process for Wheel Tracking Test .....	34
Fig. 4.5 Specimen manufacture equipment .....	34
Fig. 4.6 Wheel Tracking Test Machine .....	35

Fig. 4.7 Dimensions of specimens .....	37
Fig. 4.8 Manufacturing process of the slab .....	38
Fig. 4.9 Manufacturing process of the asphalt concrete .....	39
Fig. 4.10 Manufacturing process of the joint .....	41
Fig. 4.11 Relaxation test results of APJ at 2°C (Bramel et al, 1999) .....	45
Fig. 4.12 Stress-strain curves of asphalt mixture with aggregate volume fraction of 64% .....	45
Fig. 4.13 Test equipment .....	46
Fig. 4.14 Screw jack .....	46
Fig. 4.15 Real view of test set-up .....	47
Fig. 4.16 Cross section for the test (unit: mm) .....	50
Fig. 4.17 Foam for the joint .....	51
Fig. 4.18 Slab manufacture process .....	51
Fig. 4.19 Manufacturing process of the asphalt concrete .....	52
Fig. 4.20 Manufacture process of joint .....	53
Fig. 4.21 KALES (Korean Accelerated Loading and Environmental Simulator) .....	54
Fig. 4.22 LASER profilometer .....	54
Fig. 5.1 Real view of Wheel Tracking Test (Superphalt) .....	56
Fig. 5.2 Real view of Wheel Tracking Test (I-phalt) .....	57
Fig. 5.3 Real view of Wheel Tracking Test (Sealant) .....	57
Fig. 5.4 Wheel Tracking Test Results .....	58
Fig. 5.5 Surface strain of APJ system .....	60
Fig. 5.6 Real view of test result - APJ system .....	60
Fig. 5.7 Surface strain of APJ system .....	61
Fig. 5.8 Real view of test result - APJ system .....	62
Fig. 5.9 Surface strain of BFLJ system .....	63
Fig. 5.10 Real view of test result - BFLJ system .....	63
Fig. 5.11 Surface strain of BFLJ system .....	64

Fig. 5.12 Real view of test result - BFLJ system .....	65
Fig. 5.13 Real view of test (APJ0) .....	66
Fig. 5.14 Longitudinal test result of APJ0 .....	67
Fig. 5.15 Lateral test result of APJ0 .....	67
Fig. 5.16 Real view of test (BFLJ0) .....	68
Fig. 5.17 Longitudinal test result of BFLJ0 .....	69
Fig. 5.18 Lateral test result of BFLJ0 .....	69
Fig. 5.19 Real view of test (BFLJ1) .....	70
Fig. 5.20 Longitudinal test result of BFLJ1 .....	71
Fig. 5.21 Lateral test result of BFLJ1 .....	71
Fig. 5.22 Real view of test (BFLJ2) .....	72
Fig. 5.23 Longitudinal test result of BFLJ2 .....	72
Fig. 5.24 Lateral test result of BFLJ2 .....	73
Fig. 5.25 Real view of test (BFLJ3) .....	74
Fig. 5.26 Longitudinal test result of BFLJ3 .....	74
Fig. 5.27 Lateral test result of BFLJ3 .....	74
Fig. 5.28 Real view of test (BFLJ4) .....	75
Fig. 5.29 Longitudinal test result of BFLJ4 .....	75
Fig. 5.30 Lateral test result of BFLJ4 .....	76

## SUMMARY

Most of domestic expansion joint system was applied by exposed expansion joint system. There are cases where it is damaged by driving. As the result noise and impact happened, and the social cost due to frequent repair works is increasing. So because of the interest about buried expansion joint system, new buried expansion joint system was lately developed a system of Buried folding lattice joint(BFLJ).

BFLJ system was developed to relieve the biggest problem of Asphalt Plug Joint(APJ) system that applied in the United States and Europe, the form transformation concentration, and has an advantage of inducing an even transformation and transmitting to the asphalt mixture for induction of even transformation on the whole expansion joint system through the sub system. But the earlier study was only conducted the performance evaluation of flexibility by analysis and experiment. Because a study of durability evaluation about plastic deformation that was frequently damaged in the road is not conduct, BFLJ system is not used at present.

So in this research, we have tested for durability and flexibility performance of buried expansion joint system that based on the type of asphalt mixture. Also we have evaluated for durability of BFLJ system against vehicle load using accelerated pavement testing.

As a result of the experiment, the developed BFLJ system gives high flexibility performance and resolves transformation concentration along the joint section more than APJ system. Also it could be seen that the BFLJ system could replace APJ system. Because surface deflection of BFLJ system against vehicle load was measured low, and sub system in the buried expansion joint system was not damaged against vehicle load. And in this research, both fixed plates in sub folding lattice system of BFLJ system were

removed, because both fixed plates make difficult to construction and maintenance. Instead washers were installed. Thus, it could be seen that construction and maintenance could be easy to do.



# I. 서론

## 1. 연구배경 및 목적

신축이음장치(Expansion Joint System)는 교량의 교각이나 교대 위에 위치하여 상부구조의 온도변화, 활하중, 건조수축, 크리프 등에 의해 발생하는 신축량을 수용하고 이음부의 연속성을 확보하기 위한 장치이다. 이러한 신축이음장치는 교량 구조물의 주행성을 높여 주며, 방수가 확실하고 진동을 흡수하며, 유지보수가 용이하고, 구조물의 손상을 최대한 줄여 수명을 연장할 수 있어야 한다.

현재 국내 신축이음장치의 대부분을 차지하고 있는 노출형 시스템은 교통량의 증가, 소홀한 시공과 유지보수 불량으로 인하여 교량구성요소 중에서 가장 파손이 빈번하게 발생하는 요소로 잦은 보수공사로 인하여 많은 유지관리비가 소요될 뿐만 아니라 교통체증을 유발시키고 있다. 또한 주행 시 소음과 충격을 발생시켜 주행성을 떨어뜨리고 있다.

한편 미국과 유럽 국가에서 사용하고 있는 매설형 신축이음장치인 Asphalt Plug Joint(이하 APJ) system은 노출형 시스템과 비교하여 충격, 진동, 소음이 거의 없어 우월한 평탄성을 확보 할 수 있을 뿐만 아니라 거의 완전한 방수성능을 보여줄 수 있으며 시공과 유지보수가 쉽고 비교적 비용이 저렴하다는 장점을 가지고 있다. 이러한 매설형 신축이음장치는 6~7년의 보수주기를 기준으로 설계되었지만 때때로 시공 후 6개월 이전에 파괴가 일어나는 사례가 발생하고 있다. 이러한 조기 파손문제는 잦은 보수공사로 인하여 교통체증 등을 유발하며 이로 인한 사회적 비용은 장치의 설치비용을 훨씬 능가한다. 이러한 이유로 우수한 장점에도 불구하고 우리나라에서 적용하고 있지 못하고, 해외에서도 점점 사용이 줄어들고 있는 실정이다.

이에 노출형 시스템보다 우수한 매설형 신축이음장치의 단점을 극복하고 장점을 향상시켜 사용성이 뛰어나고 실용적이며 경제적인 매설형 신축이음장치의 연구개발이 필요하게 되었으며, 기존 연구 결과 Buried Folding Lattice Joint(이하

BFLJ) system이 제안되었다. BFLJ system은 APJ system의 변형 집중의 단점을 극복하기 위하여 스티드를 가진 Folding Lattice를 APJ system의 Gap plate 위에 설치하여 강제적으로 고른 변형을 유도하기 위한 하부 시스템이다. 하지만 기존 연구에서는 BFLJ system의 신축 성능 평가만 해석 및 실험을 통해 이루어졌을 뿐, 실제 현장에서 가장 빈번하게 파손되는 소성변형에 대한 내구성 평가가 이루어지지 않아 현재로서는 사용되고 있지 않다.

본 연구에서는 매설형 신축이음장치에 사용하게 되는 상부포장 혼합물의 강도 특성과 실제 차량 하중에 대한 내구성 평가를 통해 신축이음장치 성능이 충분히 발휘되는 공법을 적용함으로써, 시공 및 유지관리가 용이하며 내구성이 뛰어난 매설형 신축이음장치를 사용할 수 있도록 하는데 그 목적이 있다.

## 2. 연구 범위 및 방법

본 연구는 국내에 적용되어 있는 노출형 신축이음장치에 대한 문제점을 극복하기 위하여 기존 연구에서 제안된 새로운 매설형 신축이음장치를 실험을 통해 평가하고자 한다.

### □ 신축이음장치 적용 현황 및 기존 연구 고찰

현재 적용되고 있는 신축이음장치의 현황 조사 및 매설형 신축이음장치에 대한 기존 연구 고찰을 통해, 기존 매설형 신축이음장치의 문제점 분석 및 새로 개발된 매설형 신축이음장치와의 신축 성능을 비교 분석하였다. 기존 연구에서 해석/실험적으로 신축 성능에 대한 연구가 수행되었으므로, 본 연구에서는 개발된 매설형 신축이음장치의 신축 성능을 기존 연구 고찰을 통해 살펴보았다.

### □ 휠트래킹 시험을 통한 상부포장 혼합물의 소성변형 평가

휠트래킹 시험을 통해 상부포장 혼합물의 소성변형 저항성을 판단하여 도로포장에 적합한 상부포장 혼합물을 선정하였다.

□ 고온(35℃)에서의 신축시험을 통한 상부 포장 재료의 거동 평가

새로 개발된 시스템의 상부 포장재료에 대한 거동 분석을 위하여 기존 매설형 신축이음장치와 개발된 BFLJ system의 시험체를 제작하여 고온(35℃)에서의 신축시험을 실시하였다.

□ 운하중 시험을 통한 차량 하중에 대한 내구성 평가

새로 개발된 매설형 신축이음장치의 현장 적용 시 내구성 검토를 위해 차량 하중에 대해 기존 및 개발된 시스템의 시험체를 제작하여 운하중에 대한 거동을 분석하였다.



## II. 신축이음장치 적용 현황

### 1. 국내 신축이음장치 현황

신축이음장치는 구조 형식에 따라 크게 맞댐식과 지지식으로 구분될 수 있으며, 시공 방법 및 재료에 따라 포장형식, 맞댐형식, 고무관형식, 강뿔거형식, 레일형식, 특수형식으로 구분될 수 있다. 일반적으로 적용되고 있는 형식을 나타내면 Fig. 2.1과 같이 여러 가지로 분류할 수 있지만, 고속도로 교량에 적용되고 있는 형식은 많지 않다. 현재는 소규모의 교량을 제외하고 대부분의 교량에는 지지식이 많이 사용된다.



Fig. 2.1 A list of expansion joints

각각의 신축이음장치는 Table 2.1과 같이 형식에 따라 다른 허용 신축량을 갖고 있으며, 용도 및 경제성에 따라 여러 형식의 신축이음장치가 적용되고 있다. 본 연구에서의 매설형 신축이음장치는 일반적으로 신축량이 50mm 이하인 중소 규모 교량을 대상으로 적용되므로, 현재 국내에서 사용되고 있는 소용량의 신축이음장치에 대해 알아보았다. Table. 2.1에서 알 수 있는 것과 같이 50mm 이하의 신축량을 갖는 소용량의 신축이음장치로는 맹 조인트, Rubber Top 조인트, Mono Cell 조인트, NB(ACE)조인트, Transflex 조인트 등이 있다. 그러나 맹 조인트와 Rubber Top 조인트는 과거에 일시적으로 적용되었지만 유지관리에 문제가 많이 발생하여 현재는 거의 적용되지 않고 있다.

**Table 2.1** Allowable expansion length of expansion joints (mm)

신축량 제품	100	200	300	400	500	600~1200
맹 조인트	10					
Rubber Top 조인트	30					
Gai Top 조인트	30 ~ 60					
Mono Cell 조인트	30 ~ 70					
NB(ACE) 조인트	35	120				
Transflex 조인트	30		230			
강핑거 조인트	50				500	
레일 조인트	80					1200
롤러셋트 조인트				400		1200

## 1) Mono Cell 조인트

이음부 사이가 두 개의 철판과 표면 및 하면 고무로 밀폐된 구조이다. 주행면이 고무이고 조인트의 표면이 좁기 때문에 주행감이 우수하다는 장점이 있다. 주로 신축량이 적은 구조물에 적합하며, 설치 시 유간 조정이 용이하고 총신축량이 60mm 이하인 경우의 강교, PC교, RC교 등 모든 교량에 사용할 수 있다.

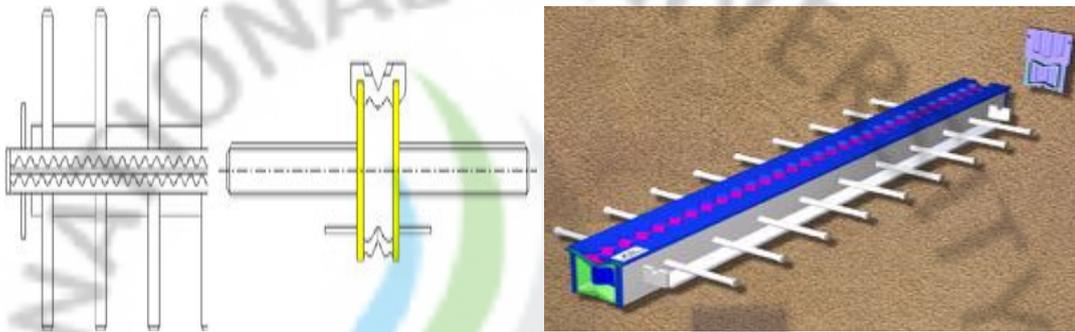


Fig. 2.2 Mono Cell joint

## 2) NB(ACE)조인트

Transflex 조인트의 개량형으로 조인트에 비하여 강판보다 조인트 표면 고무가 두꺼워 내구성 및 완충능력이 크며, 정착볼트가 조인트의 본체와 일체로 제작되어 있어 정착볼트의 풀림을 예방한 형식의 조인트이다. 충격하중을 고무의 탄성으로 흡수/분산시키며 시공이 간편하고 주행성 및 경제적으로 양호하다. 그러나 사용된 고무의 재질이 상당히 중요하며 고무판의 절삭부분이 자주 파손되어 유지보수가 잦다. 또한 콘크리트와의 접착부에 누수가 되는 경우가 많으며, 제설차량에 의하여 조인트 표면이 손상을 입을 수 있으므로 지역적 여건을 고려하여 사용해야 한다.

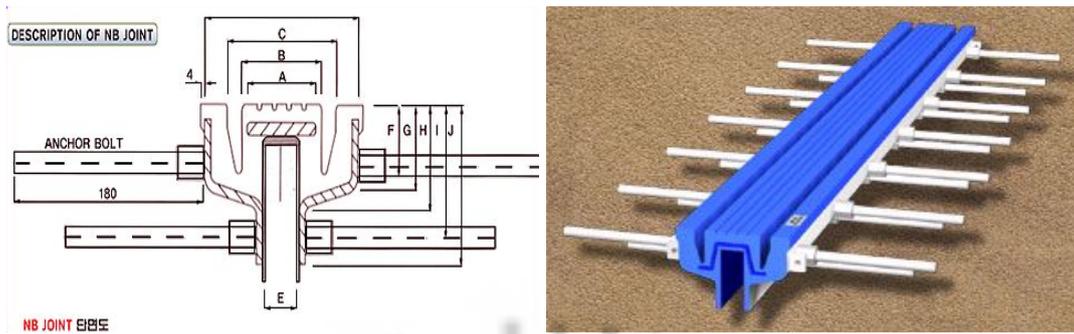


Fig. 2.3 NB(ACE) joint

### 3) Transflex 조인트

네오프렌계 고무와 강판이 일체로 제작되어 고무의 변형으로 교량 상부구조의 신축을 흡수하고 강판이 운하중을 지지하도록 되어 있다. 시공이 간편하고 주행성이 양호하며 경제적이다. 허용 신축량은 35~230mm까지 다양하나 100mm 이상의 경우에 조인트 중앙부가 솟아올라 진동 및 소음이 심하고 이에 따라 슬래브 단부의 조기파손의 우려가 있다. 또한 정착부가 주행면에 노출되어 있어 차륜에 의한 진동으로 인하여 정착 너트가 헐거워져 교통 장애를 유발하거나 조인트의 빈번한 파손의 원인이 된다.

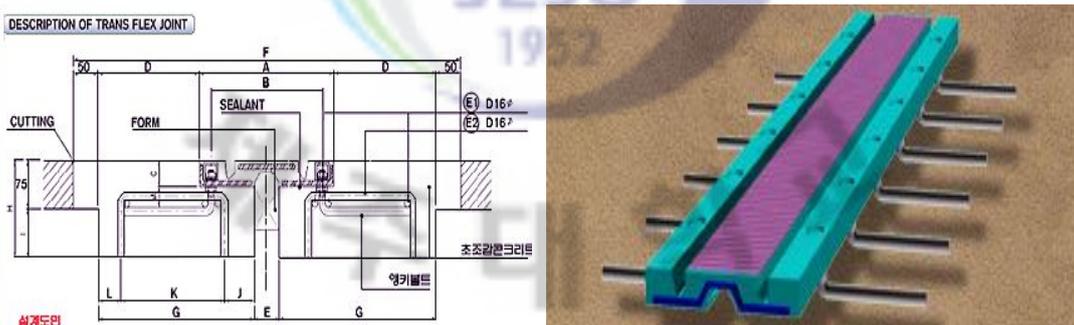


Fig. 2.4 Transflex joint

## 2. 국외 매설형 신축이음장치 현황

Fig. 2.5는 미국과 유럽 국가에서 사용되고 있는 매설형 신축이음장치인 Asphalt Plug Joint system을 나타낸 것이다. 우리나라에서는 포장형 조인트 또는 연속형 조인트로 알려져 있으나, 거의 사용되지는 않고 있다. 일반적인 APJ system은 무게비로 20%의 역청(Bitumen)과 80%의 골재로 구성된 유연한 아스팔트 포장혼합물로 신축이음부를 메우는 형태의 신축이음장치이다.

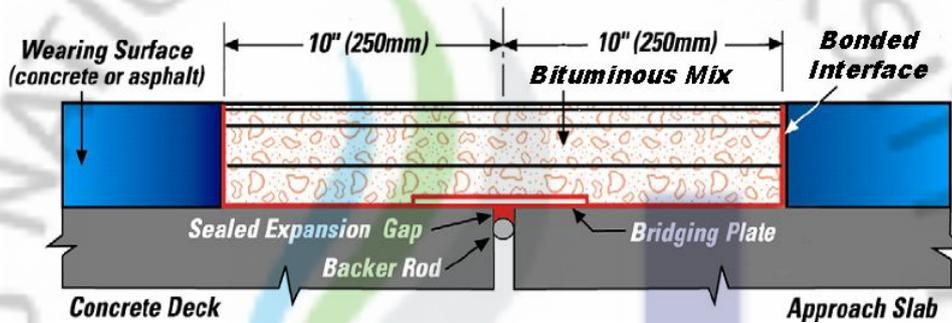


Fig. 2.5 Schematic sketch of Asphalt Plug Joint

APJ system은 도로 포장과 신축이음부의 매끄러운 연결을 가능케 하여 평탄성을 확보하고 교량 상부구조에서 발생하는 신축을 상부포장 재료 자체에서 흡수하여 해소하는 조인트 시스템으로, 충격, 진동, 소음이 거의 없어 주행성이 양호하고 거의 완전한 방수성능을 보여줄 수 있으며 시공과 유지보수가 쉽고 비교적 비용이 저렴하다는 장점을 가지고 있다. 그러나 이러한 매설형 신축이음장치는 몇 가지 커다란 단점을 가지고 있다. 즉, 상부 포장재료의 특성이 온도에 크게 의존하고 있어 온도가 높을 때는 연성이 커지며 온도가 낮을 때는 취성이 커진다. Fig. 2.6은 APJ system의 파괴 형태를 나타낸 것으로, 높은 기온 하에서 교통량이 많을 경우에는 패임 현상이 발생하게 되고, 교통량이 적은 경우에는 융기현상이 발생하여 결국 포장재료의 박리나 쪼개짐에 이르게 된다. 반면, 낮은 기온 하에서는 포장재료가 연성을 잃고 취성적으로 변하여 균열을 발생시키며 결국 누수 및 포장면에서의 탈착에 이르게 된다. 이러한 이유로 우수한 장점에도

불구하고 해외에서도 점차 사용이 감소하고 있는 실정이다.

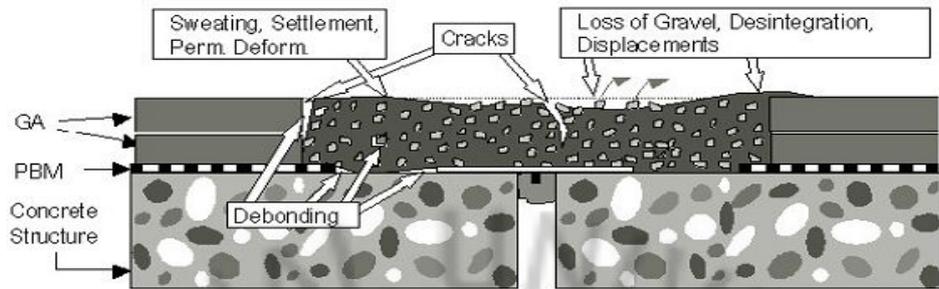


Fig. 2.6 Typical distress types with APJ (Partl et al. 2002)

Fig. 2.7은 Bramel et al. (1999)이 미국에서 매설형 신축이음장치의 사용 현황에 대해 조사한 결과를 나타낸 것이다. 매설형 신축이음장치를 적용해 본 경험이 있는 41개 주 중 18개 주에서는 더 이상 매설형 신축이음장치를 설치하지 않고 있는 것을 알 수 있으며, 이는 매설형 신축이음장치의 경우 위에서 언급한 단점들로 인해 빈번한 파손이 발생하기 때문이다.

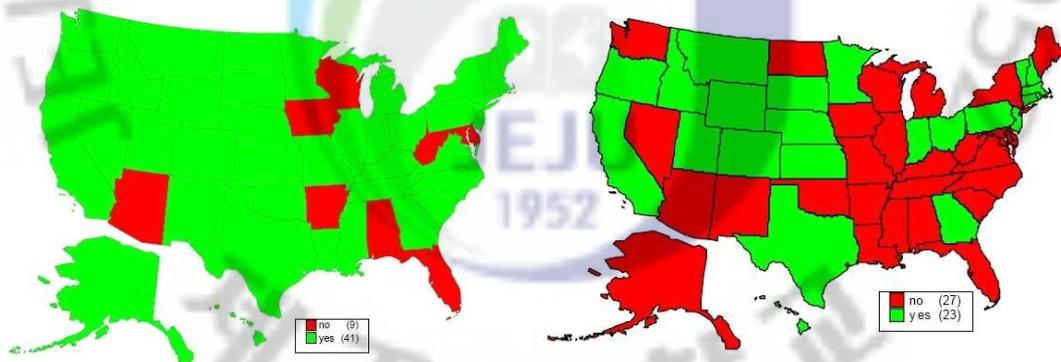


Fig. 2.7 Usage of APJs (Bramel et al. 1999)

매설형 신축이음장치의 사용에 대한 상황은 영국과 스위스에서와 비슷하다. 영국의 경우 매설형 신축이음장치의 사용이 활발하며, Bridge Joint Association에서는 매설형 신축이음장치에 대한 표준 규격을 발표하였다(Bridge Joint Association, 2003). Reid et al. (1998)에 따르면 영국에서는 매설형 신축이음장치의 유지관리에 일 년에 £20,000,000의 비용이 사용되고 있다고 한다. 또한 Partl

et al. (2002)에 따르면 매설형 신축이음장치는 1980년대에 스위스에 도입되었으며, 기존 신축이음장치를 성공적으로 대체하고 있다고 한다. 스위스 역시 매설형 신축이음장치에 대한 지침을 가지고 있다. 그러나 한편으로는 매설형 신축이음장치의 도입이 성공적으로 이루어진 영국 및 스위스에서도 미국에서와 마찬가지로 조기 파손의 사례가 보고되고 있는 것도 사실이다.

### 3. 적용 현황 분석

현재 국내 고속도로 교량에 시공된 신축이음장치를 나타내면 Fig. 2.8과 같다. Fig. 2.8에서 알 수 있는 바와 같이 고속도로 교량에 시공된 신축이음장치는 레일식, NB, Mono Cell과 Transflex 형식이 가장 많으며, 최근에는 장대교량의 시공이 증가하면서 레일 형식과 핑거 형식의 적용이 크게 증가하고 있다.

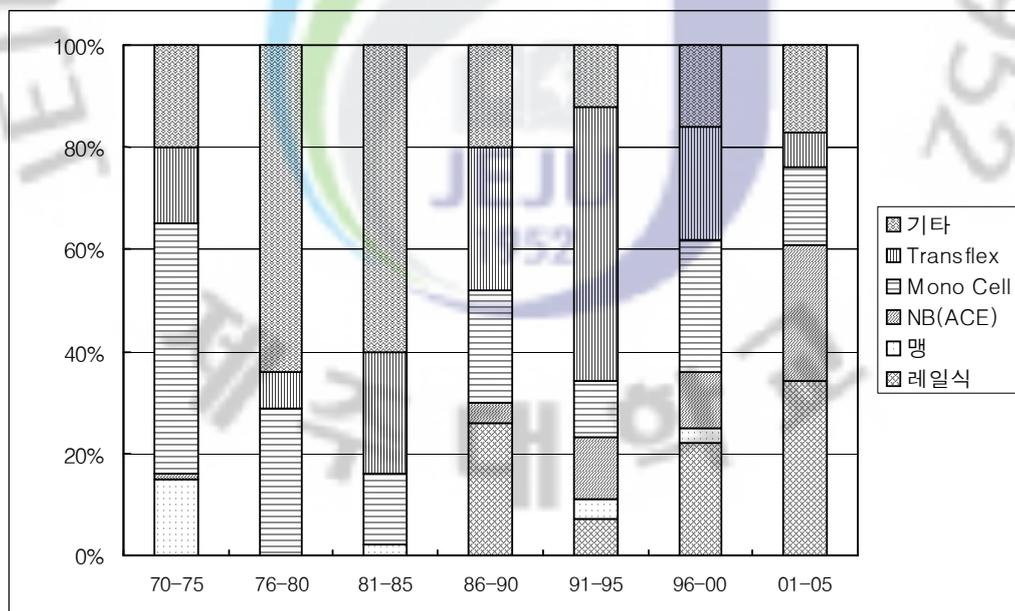


Fig. 2.8 Domestic installed condition of the expansion joint

고속도로 교량의 신축이음장치 중 NB(ACE)와 Mono Cell 형식의 설치 비율이

높은 것은 초기 시공비가 저렴하기 때문인데, 누수 등에 의한 손상이 조기에 발생되어 유지관리에 많은 문제를 야기하고 있어 유지관리성을 고려하면 보다 내구성 있는 형식을 적용하는 것이 합리적이다.

1991년부터 2000년까지 준공된 1,000여개 고속도로 교량의 신축이음장치 적용 및 하자 발생 현황에 대한 조사결과에 따르면 전체 신축이음장치에 있어 Transflex 조인트가 37%, 레일식 조인트가 30%, Mono Cell 조인트가 19%, NB(ACE) 조인트가 11%를 각각 점유하고 있는 것으로 나타났다. 적용된 신축이음장치의 하자 분석에 따르면 전체 신축이음 중 NB 형식과 Transflex 형식의 신축이음장치에서 각각 24%와 19%의 하자가 발생하여 높은 하자율을 보여주는 것으로 나타났다. 이러한 고무제 신축이음장치는 고무 자체의 내구성이 떨어져 파손이 자주 발생하며, 1.0~1.8m 단위의 기성 제품을 현장에서 이어 시공함으로써 이음부에서 누수가 종종 발생하는 것으로 나타났다. 최근에는 높은 하자율로 인하여 Transflex 형식과 NB(ACE) 형식의 사용이 지양되고 있으며, 100mm 이하의 신축이음장치로는 상대적으로 하자율이 낮은 Mono Cell 형식과 Strip Seal 형식의 사용이 증가하고 있다. Mono Cell 신축이음장치는 구조가 간단하며 내구성 및 신축과 회전에 대한 적응성이 뛰어난 것으로 평가되어 많이 적용되고 있지만 일정한 길이의 기성제품을 현장으로 반입하여 시공하고 있어 이음부에서의 누수 문제와 고무 제품 자체의 내구성 문제가 제기되고 있다.

위와 같이 우리나라는 노출형 신축이음장치에 대한 연구는 활발하지만, 기존 조인트의 문제점 극복하기 위한 새로운 매설형 신축이음장치에 대한 연구개발은 아직까지 미흡한 상태이다. 현재까지 국내 신설교량에 대한 매설형 신축이음장치를 사용하는 곳은 없으며, 신축이음보수나 터널 및 지하차도 조인트 보수공사 쪽으로 사용되고 있는 실정이다. 대부분이 Transflex 조인트 보수용으로 사용되었으나, 균열 및 소성변형 현상에 의해 포장파손 현상이 발생하고 있다.

2009년 현재 우리나라의 교량은 25,792개소로 교장이 100m 이하인 소규모 교량이 19,851개소로 약 77%를 차지하고 있으며 교장이 100m 이상인 중규모 교량은 5,941개소로 23%를 차지하고 있다. 매설형 신축이음장치는 일반적으로 신축량이 50mm 이하인 경우에 사용되고 있는데, 이는 보통지방의 경우 온도에 의한 신축량을 기준으로 할 때 신축이음부의 간격이 약 100m에 해당된다. 중규모 교

량도 신축이음부의 간격이 보통 100m 이하인 점을 고려한다면 기존 매설형의 단점을 개선시키고 성능을 향상시킨 매설형 신축이음장치는 거의 대부분의 중소규모의 교량에 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 기존 매설형 신축이음장치보다 신축 성능을 향상시킨 새로운 매설형 신축이음장치는 차량 하중에 대한 내구성이 확보된다면 국내 대부분의 교량에 효과적으로 적용될 수 있다.



### III. 기존 연구 고찰

#### 1. 개요

매설형 신축이음장치는 시행착오에 의해 개발된 것으로 그 거동에 대한 철저한 이해없이 사용되어 왔으며, 현재까지도 매설형 신축이음장치에 대한 연구사례는 많지 않다. 연구 사례도 주로 설계기준 개발 및 기하학 형상을 수정하여 APJ system의 신축성능을 더욱 좋게 하기 위한 연구로, 새로운 매설형 신축이음장치를 개발하기 위한 연구는 아니었다. 이에 국내에서는 Hong. S. H.(2008)이 새로운 매설형 신축이음장치 BFLJ system을 제안하였으며, 다른 연구에서와 마찬가지로 신축 성능에 관한 연구를 수행하였다. 하지만 신축 성능에 관한 연구만 있을 뿐 내구성에 관한 연구 내용은 없어 본 연구에서는 이에 대한 연구를 수행하고자 연구 사례를 찾았으나, 조인트의 내구성에 관한 연구는 찾을 수 없었다.

본 연구에서는 아스팔트 및 콘크리트 포장의 내구성 판단을 위해 사용되어지는 윤하중 시험을 통해 신축이음장치의 내구성을 판단하려 하며, 본 장에서는 매설형 신축이음장치의 신축 성능을 향상시키기 위한 기존 연구를 살펴보았다. 우선 본 연구에서 내구성을 판단하려 하는 매설형 신축이음장치 BFLJ system의 실험을 통한 신축 성능을 살펴보고, 유한요소해석을 통한 APJ 및 BFLJ system의 기존 연구 사례를 살펴보았다.

#### 2. 매설형 신축이음장치 BFLJ system의 개발

국내에서 매설형 신축이음장치에 대한 연구는 미흡한 상태로, 이에 대한 연구의 필요성이 대두되었고, 이에 Hong S. H.(2008)은 기존 매설형 신축이음장치의 단점을 극복하고 장점을 향상시키기 위하여 하부 시스템의 구조를 Folding

Lattice system 형식으로 제작하여 설치한 Buried Folding Lattice Joint(BFLJ) system을 개발하였다. Fig. 3.1은 새로 개발된 BFLJ system을 나타낸 것으로, 기존 APJ system의 가장 큰 문제점인 상부 포장 재료의 균열, 누수, 박리, 탈착, 쪼개짐 등으로 인한 조기파손을 방지하기 위한 응력집중 해소를 목적으로 개발되었다. 이 system은 교량 상부구조에 발생하는 신축을 하부시스템을 통하여 고른 변형을 상부재료에 전달하여 시스템 전체에 고른 변형을 유도할 수 있는 장점을 가지고 있다. 실험 결과를 살펴보면 다음과 같다.

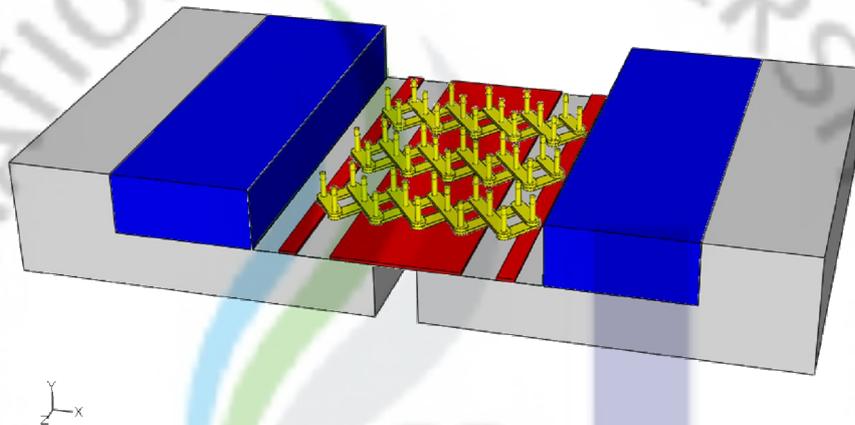


Fig. 3.1 BFLJ(Buried Folding Lattice Joint) system

1) 기존 매설형 신축이음장치(APJ system) 시험

Fig. 3.2는 신축에 따른 시험체 표면의 구간별 변형률을 나타낸 것으로, 실험결과 인장 시 접합부에 변형집중이 발생하였으며 이후 중앙부(7~9번)와 접합부(2~3번, 13~14번)에 큰 변형이 일어났다.

실험 결과 Bramel의 연구(Bramel et al, 1999)에서와 같이 신축에 대하여 철판 양끝 부분에서 발생한 변형이 45° 정도의 각을 이루며 표면으로 확산되었다고 판단하였으며, 확산된 변형은 중앙부와 접합부에 큰 변형을 유도하고 철판 끝부분의 표면에는 낮은 변형을 나타내는 것으로 나타났다.

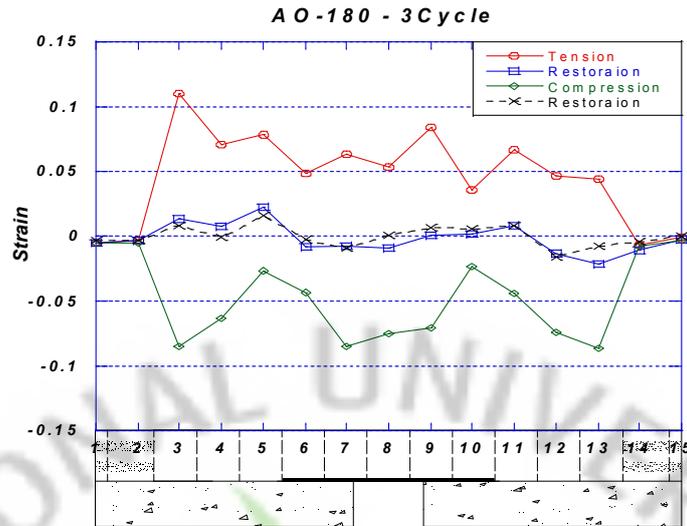


Fig. 3.2 Surface strain of APJ system

2) 개발된 매설형 신축이음장치(BFLJ system) 시험

Fig. 3.3은 신축에 따른 시험체 표면의 구간별 변형률을 나타낸 것으로, 실험결과 개발된 매설형 신축이음장치 BFLJ system은 인장과 압축 시 조인트 전체에 완만한 변형을 유도하였으며, 중앙부에는 높은 변형을 유도하고 접합부에는 낮은 변형을 유도했다. 이는 기존 매설형 신축이음장치의 철판 끝에서 발생하는 변형이 표면으로 확산되는 경향과 달리 하부시스템인 Folding lattice system의 영향으로 조인트 전체에 강제적으로 고르게 유도하여 변형을 분포시킨 것으로 판단하였다.

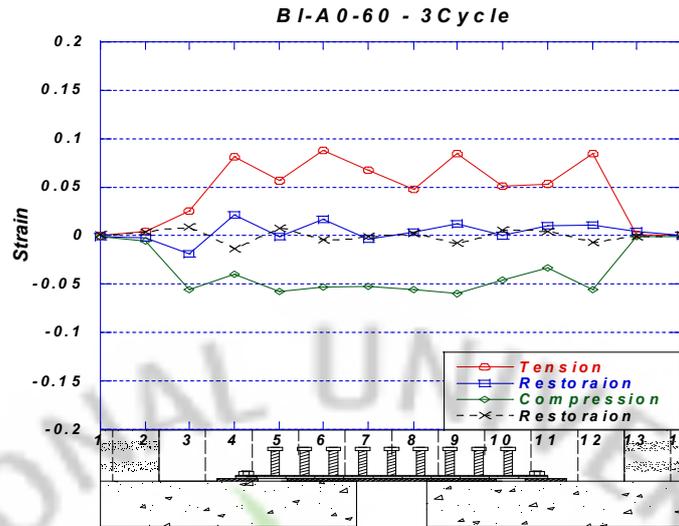


Fig. 3.3 Surface strain of BFLJ system

실험 결과를 살펴보면, APJ system의 조기 파손 유형인 상부 포장재료의 인장 균열과 접합부의 Debonding현상은 신축에 따라 철판 끝에서 큰 변형이 발생하여 접합부로 확산되기 때문이다. 이에 응력 집중 완화를 위한 BFLJ system의 경우 시스템 전체에서 신축이 이루어지게 되어 접합부의 변형 집중을 해소시킬 수 있어 조기 파손을 방지할 수 있을 것이라 판단된다. 하지만 앞서도 언급되었듯이 신축시험만으로는 BFLJ system이 APJ system을 대체할 수 있다고 판단하기에는 무리가 있다. 또한 하부 시스템을 일체형으로 만든다면 유지보수 측면에서도 어려움이 있을 것으로 보여 이에 대한 개선이 필요하다고 판단된다.

### 3. 매설형 신축이음장치의 유한요소해석

매설형 신축이음장치는 시행착오에 의해 개발된 것으로 그 거동에 대한 철저한 이해없이 사용되어 왔으며, 현재까지도 매설형 신축이음장치에 대한 연구사례는 그다지 많지 않다. 매설형 신축이음장치의 연구사례 중 가장 광범위한 연구는 미국 University of Wyoming의 Bramel et al.(1999)이 수행한 것으로 매설형 신축이음장치의 설계기준을 개발하기 위한 것이었다. 이외에도 영국의 University

of Aberdeen의 Reid et al.(1998), Qian et al.(2000, 2002) 등이 매설형 신축이음 장치의 응력과 변형에 대한 해석 및 대안적 형상 등에 관한 다수의 논문을 발표하였다. 또한 미국 University of Michigan의 Phillip Park(2007, 2009)이 매설형 신축이음장치에 대한 또 다른 연구 결과를 내놓았다. Phillip Park은 기존 매설형 신축이음장치의 최적 형상에 관한 연구를 하였고, 최근에는 기존 APJ system과 BFLJ system을 비교하는 연구 자료도 내놓았다.

본 장에서는 매설형 신축이음장치에 대한 파괴양상 및 조기파손의 방지를 위한 대안적 설계 등의 연구를 수행한 Bramel et al.(1999), Reid et al.(1998), Qian et al.(2000), Phillip Park(2007, 2009)의 연구 성과를 중심으로 검토하였다.

#### 1) 기존 매설형 신축이음장치(APJ system)의 유한요소해석

Fig. 3.4는 ‘표준형(standard type)’으로 지칭된 기존 매설형 신축이음장치(APJ system)의 형상을 나타낸 것이며, Fig. 3.5는 University of Wyoming의 Bramel et al.(1999)이 제안한 매설형 신축이음장치의 대안 형상이다. 또한 Fig. 3.6은 University of Aberdeen에서 제안한 대안 형상이다. University of Aberdeen에서는 최초 Reid et al.(1998)이 사다리형 및 파형의 두 가지 형상을 제안하였으나 Qian et al. (2000)의 후속 논문에서는 별다른 설명 없이 파형 조인트를 제외하였다. 여기에서는 Qian et al.의 사다리형과 Bramel et al.의 대안 형상을 비교하였다.

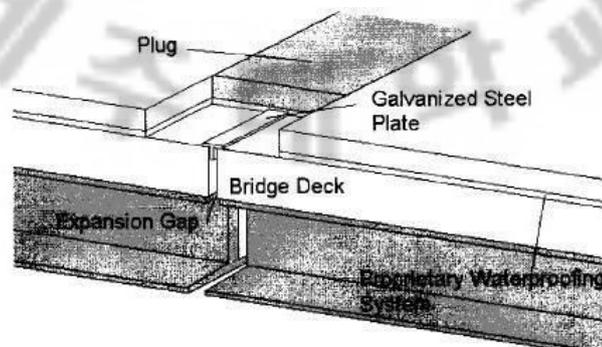


Fig. 3.4 Schematic of standard APJ system (Reid et al., 1998)

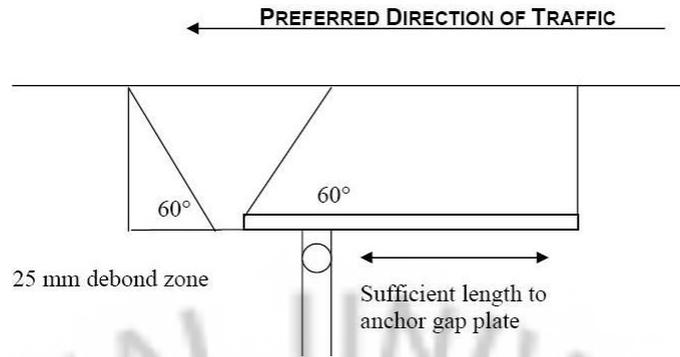


Fig. 3.5 Optimized joint geometry proposed by Bramel et al. (1999)

먼저 Bramel et al.이 제안한 직사각형 설계는 운하중의 효과를 고려하지 않고 신축변형에 대한 해석결과를 근거로 제시되었다. 따라서 매설형 신축이음장치의 대안적 형상에 대한 결론은 통행하중에 대한 고려가 결여된 것임을 유의할 필요가 있다. 해석결과에 따르면 변형률의 발생은 강판의 움직임에 따라 한쪽의 모서리로부터 확산되는 60°의 각도를 갖는 삼각형의 영역에 한정되며 이 영역을 유효길이라 칭하였다. 따라서 강판이 움직이는 방향을 한쪽으로 제어하면 단지 유효영역만의 범위에 신축이음을 설치할 것을 제안하였다. 그러나 Bramel et al.은 해석결과에 대한 설명은 매우 간결하며, 특히 60°라는 특정 각도가 발생하는 원인 등에 대한 고찰을 시도하지 않았기 때문에 그다지 설득력이 있지 않다. Bramel et al.의 또 다른 제안은 강판 바로 위에서의 파괴를 방지하기 위한 매설형 신축이음장치의 최소 두께는 50 mm 이상이어야 한다는 것이다.

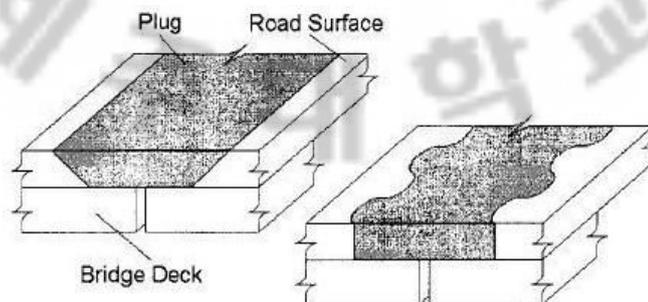


Fig. 3.6 Proposed alternative APJs (Reid et al. 1998)

Qian et al.(2000)의 사다리형 신축이음장치의 최적 형상에 대한 제안은 매우

설득력이 있는 논증이 뒷받침되고 있다. 그러나 Qian et al.의 경우 통행하중의 영향만을 고려하고 신축변형의 영향에 대해서는 고려하지 않았다는 점은 그의 논문에서 아쉬운 부분이라 할 수 있다. Qian et al.의 해석결과에 따르면 포장과 신축이음부 경계면의 기울기 증가를 통한 접촉면적의 증가는 응력집중 및 응력역전의 효과를 감소시키는 것이 확인되었으며, 응력역전이 발생하지 않게 하려면 최소한 30° 이상의 각도를 가져야 한다고 결론지었다. 매설형 신축이음장치의 폭이 유효길이 이상으로 클 필요가 없다는 Bramel et al.의 주장과는 달리, Qian et al.은 강판의 모서리와 포장과의 경계면 사이에는 최소한 매설형 신축이음장치의 두께 이상의 간격을 갖도록 충분한 길이를 확보해야 한다고 주장한다. 또한 강판 모서리에서의 응력집중을 완화하기 위해서는 강판의 모서리를 둥글게 하는 것이 도움이 된다고 하였다.

두 연구팀에서 각각 제시하는 공통되는 의견은 대칭적 형상보다는 비대칭 형상이 더 유리할 것이라는 예측이다. 그러나 그러한 예측의 근거는 서로 다르다. Fig. 3.5에 나타난 바와 같이 Bramel et al.의 제안은 강판의 길이를 한쪽으로 확장하여 강판의 움직임을 특정 방향으로 제어하고 통행하중의 방향도 특정 방향으로 향하는 것이 좋다고 하였다. 그러나 Bramel et al.은 이러한 제안에 대한 설득력 있는 논증을 제시하지 않고 있다. 한편 University of Aberdeen의 Reid et al.(1998) 역시 그들의 해석결과 차량진행 방향에 따라 양 경계면에서의 응력집중도가 다르게 나타난다는 점을 근거로 재료 사용의 효율성 면에서 비대칭 형상을 고려해볼 만 하다는 의견을 제시하고 있다.

양측에서 제시하는 이러한 대안 형상은 서로 다른 하중조건, 해석조건 및 가정에 근거하고 있어, 연구를 통해 이들의 주장을 재평가하고 보다 포괄적인 설계 지침을 제시할 필요가 있다.

이에 Phillip Park(2007)은 이전 연구결과들을 바탕으로 새로운 해석 모델을 통해 Fig. 3.7과 같은 APJ system의 최적 형상을 제안하였다.

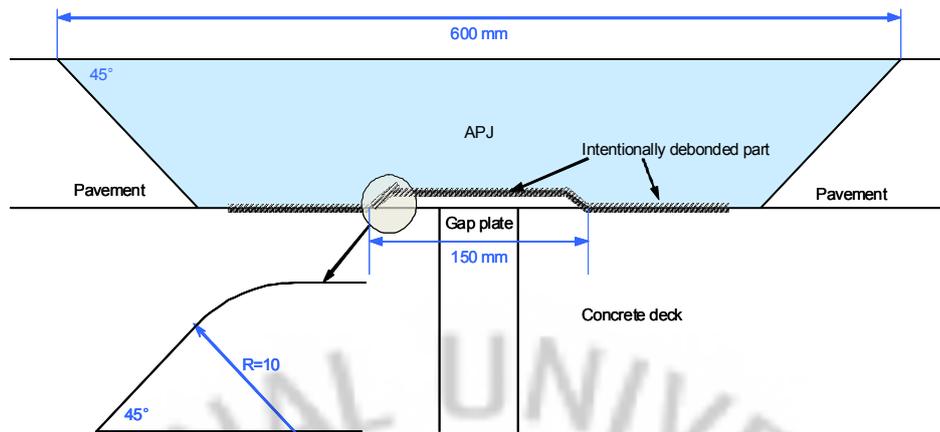


Fig. 3.7 Suggested optimum APJ design

Phillip Park은 이전 연구들에서 사용되던 탄소성 재료 모형의 경우 재료 상수가 취득된 특정 변형률 속도 및 하중 하에서는 거동을 유사하게 모사할 수 있으나 하중 조건이 조금만 달라져도 거동을 제대로 반영하지 못한다고 판명하였다. 특히 매우 느린 변형률 속도를 가지는 신축 변형에 대한 해석에서는 탄소성 모형에서의 오차가 크기 때문에 시간 의존적 모형인 점성 모형을 사용하는 것이 합리적이라고 판단하였다. 연구 결과 APJ의 최적 형상은 응력 집중을 10~60% 감소시켰으며, APJ system의 하단 경계면을 의도적으로 분리하는 것이 응력 집중의 완화에 도움이 된다고 하였다. 이에 따라 제안된 최적 형상을 적용한다면 기존 APJ system에서 발생하는 조기 파손을 방지하고 공용 수명을 연장할 수 있을 것으로 기대하였다.

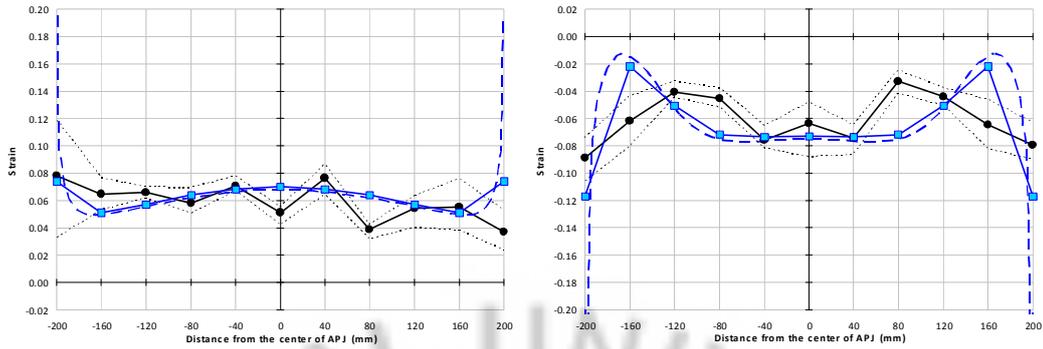
하지만 이러한 APJ system의 형상 개선만으로는 응력의 집중이 사라진 것은 아니기 때문에 조기 파손의 가능성이 완전히 사라졌다고 보기는 힘들다. 또한 접합부의 경사진 형상의 경우 실제 현장 적용이 충분히 고려되지 않아 어려움이 있으며, 더욱이 이러한 형상은 차량 하중에 의해 접합부 부근에서의 포장 재료의 균열 및 탈락으로 인한 조기파손의 우려가 있다. 따라서 공용 수명의 연장 및 조기 파손의 방지를 위해서는 신축 변형 및 통행 하중으로부터 기인하는 응력 및 변형률을 충분히 지탱할 수 있는 재료 개선이 필요하다.

## 2) 개발된 매설형 신축이음장치(BFLJ system)의 유한요소해석

Phillip Park(2009)은 개발된 매설형 신축이음장치(BFLJ system)의 유한요소해석을 통해 기존 매설형 신축이음장치와의 비교 평가를 위한 연구를 수행하였다. 이전에 APJ system을 해석할 때 사용했던 점소성(visco-plastic) 재료 모형이 사용되었으며, Hong S. H.이 실험한 APJ 및 BFLJ system의 실험 결과를 가지고 유한요소해석 결과와 일치하는지도 알아보았다.

해석 시 APJ system의 단면형상은 길이방향에 대하여 일정하므로 2차원으로 모형화 하는데 무리가 없었으나 BFLJ system은 스테드 존재에 의해 일정한 단면을 가지지 않으므로, APJ 해석 결과 및 실험 결과와의 원활한 비교를 위하여 BFLJ system 단면 중 가장 많은 스테드가 포함된 단면, 즉 가장 취약할 것으로 여겨지는 단면을 선택하여 2차원으로 모형화 하였다.

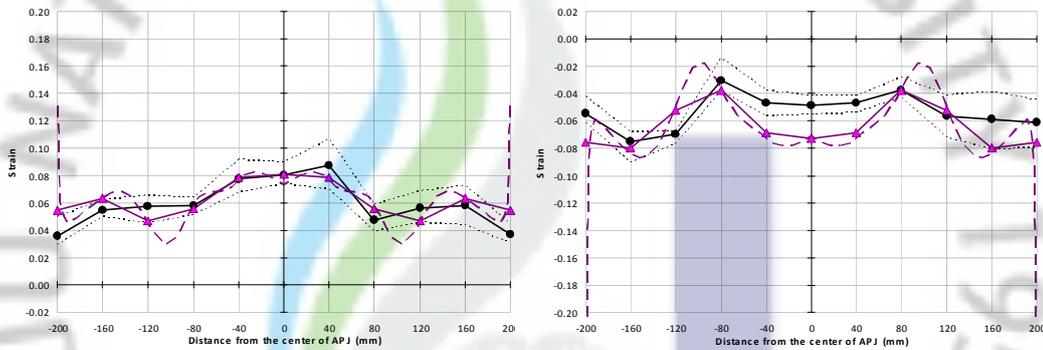
Fig. 3.8과 Fig. 3.9는 Phillip Park의 해석 및 실험을 통해 최대 압축 및 인장 변위 상태에서 측정된 표면 변형률을 APJ 및 BFLJ system으로 나누어 비교한 것이다. 전체적으로 동일한 방식으로 얻어진 평균 변형률은 실험값 및 해석값이 잘 일치하였다. Fig. 3.8과 Fig. 3.9에서 볼 수 있듯이 최대 인장 변위에서의 평균 변형률은 해석값이 측정 범위 내에서 잘 일치하고 있으며, 최대 압축 변위에서의 평균 변형률은 일부 측정범위를 벗어나는 구간이 있으나 변형 양상 등이 대체로 유사하게 나타나고 있다. 또한 BFLJ system에서 아스팔트 포장과 조인트의 접합부의 변형률 집중이 완화된 것을 확인하였다. 결과적으로 그의 연구에서 BFLJ system은 APJ system에 비해 포장과 조인트의 경계면에서 발생하는 국부적 응력집중을 완화하는데 기여한다고 할 수 있다.



(a) 25mm tension

(b) 25mm compression

Fig. 3.8 Comparison of FEM vs. experiment surface strain of APJ system



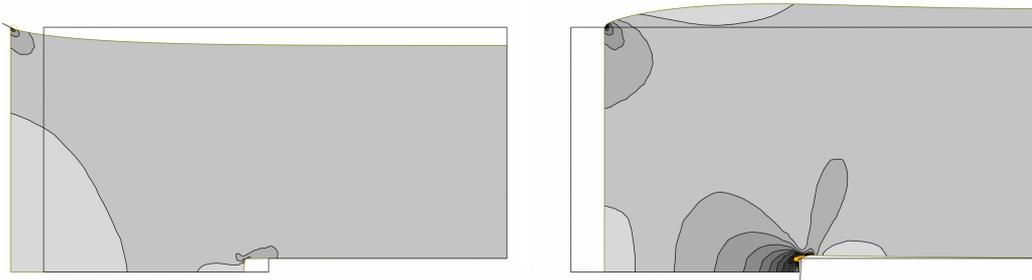
(a) 25mm tension

(b) 25mm compression

Fig. 3.9 Comparison of FEM vs. experiment surface strain of BFLJ system

다음 Fig. 3.10과 Fig. 3.11은 해석이 수행된 APJ 및 BFLJ system 모형의 내부 최대 주 변형률(maximum principal strain) 분포를 나타낸 것이다.

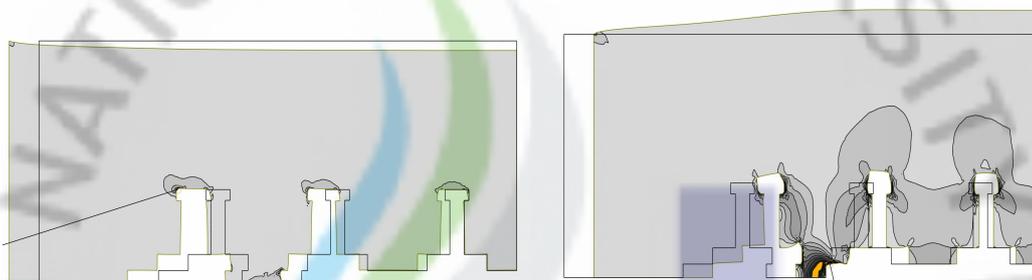
해석 결과 BFLJ system 모형에서 깃 플레이트 단부에 APJ system 모형보다 과도한 변형률이 발생하였으며 스티드 주변에서도 변형률의 집중 현상이 발생하였다. 그 반면 앞서 표면 변형률의 결과와 마찬가지로 포장과의 경계면 상단의 변형률은 BFL system에서 더 낮게 나타남이 확인되었다. 결론적으로 BFLJ system은 APJ system에 비해 포장 조인트 경계면에서의 파손 가능성을 줄일 수 있지만 조인트 내부에 변형률의 집중을 유발하는 부작용이 있고, 그 부작용은 스티드 주변의 부착력을 최소화함으로써 다소 완화될 수 있음이 확인되었다.



(a) 25mm tension

(b) 25mm compression

**Fig. 3.10** Contours of maximum principal strain : APJ system



(a) 25mm tension

(b) 25mm compression

**Fig. 3.11** Contours of maximum principal strain : BFLJ system

## IV. 실험 계획

### 1. 실험개요

실험은 기존 매설형 신축이음장치의 문제점인 응력 집중을 해소하기 위하여 개발된 BFLJ system의 상부 포장 혼합물 선정 및 차량 하중에 따른 거동을 분석하여 실제 사용을 위한 내구성을 평가하고자 휠트래킹 시험, 상부 포장재료에 따른 신축시험, 운하중 시험을 실시하였다.

기존 연구를 바탕으로 실험에 사용할 매설형 신축이음장치의 하부 시스템 및 사용재료를 결정하였다. 또한 기존 연구에서 사용된 상부포장 재료 외에 추가적인 상부 재료를 사용하였으며, 유지관리 측면에서 하부 시스템의 형상을 개선하여 실험하였다.

### 2. 매설형 신축이음장치 구성요소 및 사용재료

매설형 신축이음장치는 크게 하부 시스템과 상부 포장 혼합물로 구분된다.

#### 1) 하부 시스템

Fig. 4.1은 시험체 제작 시의 매설형 신축이음장치의 하부 시스템을 나타낸 것으로, 기존 APJ 및 BFLJ system을 나타낸 것이다. 기존 APJ system의 하부 시스템의 경우 슬래브 간의 겹 위에 겹 플레이트를 얹혀 놓는 방식으로 매우 단순한 구조로 되어있다. BFLJ system의 하부 시스템은 APJ system의 겹 플레이트 위에 Folding Lattice system을 추가 제작하여 슬래브에 설치한 것이다. Folding Lattice system은 Lattice와 스티드로 나눌 수 있으며, Lattice는 교량상판에 발생

하는 신축에 대해 전체적으로 system의 움직임은 유도하여 집중변형을 해소하는 역할을 하며, 스티드는 Lattice에서 유도된 고른 변형을 상부재료에 전달하는 역할을 한다.



(a) APJ system

(b) BFLJ system

**Fig. 4.1** Substructure of buried expansion joint system

본 연구에서 Folding Lattice 시스템의 Lattice부재는 확실한 고른 변형을 유도하기 위하여 강성을 고려하여 철판을 사용하여 제작하였으며, 고른 변형 유도 시 결합부분의 유격에 의한 손실을 없애기 위하여 정밀 제작하였다. 또한 상부재료에 고른 변형을 전달하기 위한 스티드는 신축 시 발생하는 휨에 대한 강성을 고려하여 볼트를 사용하였고, 스티드 상부에는 나비너트를 이용하여 표면적을 증가시켜 확실한 변형을 전달할 수 있도록 제작하였다.

기존 연구에서는 시스템 양 끝에 시스템을 슬래브에 고정시키기 위한 고정철판이 존재하였으나, 본 연구에서는 시공 시 용이하고 보수 시에도 일부 시스템만을 보수할 수 있도록 하기 위해 양 끝 고정철판을 없앴다. 대신 BFLJ system을 겹플레이트와 높이를 맞추기 위하여 겹플레이트와 같은 높이의 와셔(washer)를 사용하였다. Fig. 4.2는 BFLJ 하부시스템인 Folding Lattice system 구성요소와 재원을 나타낸 것이고, Table 4.1은 하부시스템의 구성 재료를 나타낸 것이다.

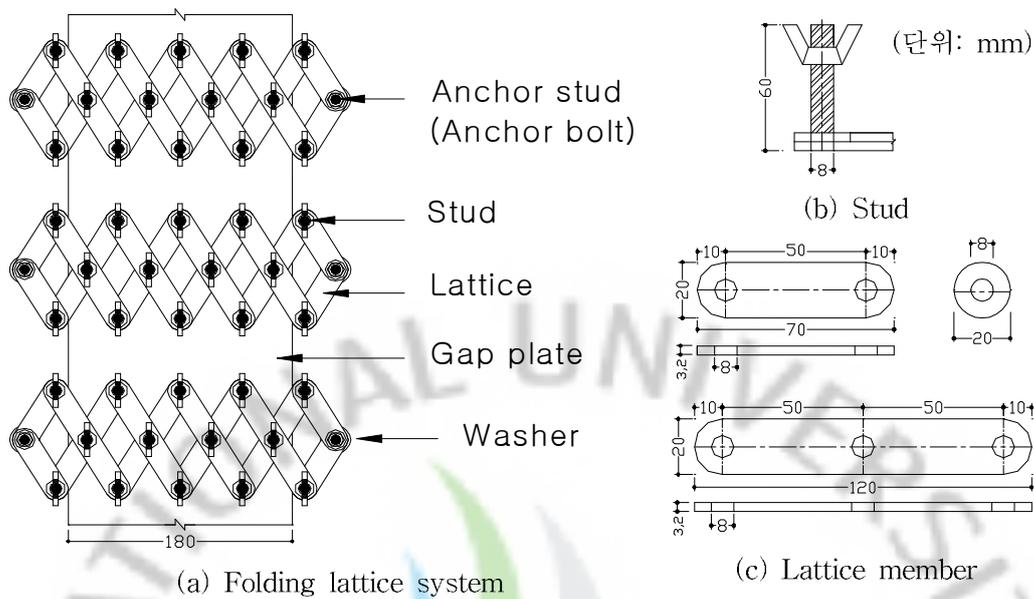


Fig. 4.2 Component and dimension of folding lattice system

Table 4.1 Components of folding lattice system

항목 구분	Lattice member	Stud		Washer	Gap plate
사용 재료	SM400 (3.2mm)	볼트 (8mm)	나비너트 (8mm)	SM400 (4.5mm)	SM400 (4.5mm)
size	Fig. 4.2 참조				폭 180mm

## 2) 상부 포장 혼합물

조인트 내의 상부 포장 혼합물은 Fig. 4.3과 같이 기존 매설형 신축이음장치에서 사용되는 것과 같은 골재와 binder를 혼합한 아스팔트혼합물로 구성되었다. 이러한 혼합물은 신축과 차량하중에 따른 변형을 조인트 자체적으로 원활하게 흡수할 수 있다. 골재는 차량 하중으로부터 혼합물의 소성변형 저항성 향상시키는 역할을 하며, binder는 교량 상부구조의 움직임을 흡수하여 혼합물의 균열을 억제

하는 역할을 한다.



Fig. 4.3 Bituminous mixture of joint

따라서 binder는 매설형 신축이음장치에 있어 신축을 흡수할 수 있는 재료이다. 이러한 binder의 함량이 증가할수록 조인트 내에 차지하는 비율이 높아져 교량의 신축을 원활하게 흡수할 수 있지만, binder의 함량을 너무 증가시키면 차량 하중에 의한 소성변형에 대한 저항성이 떨어진다. 따라서 binder의 함량을 증가시킬 뿐만 아니라 소성변형에 대한 저항성을 확보하기 위해서는 골재의 입도 선정이 중요하다.

binder의 함량을 증가시키기 위해서는 골재 사이의 공간을 확보해야 하며, 이는 똑같은 크기의 단입도 골재만을 사용하면 최대 33.3%의 공간을 확보할 수 있다. 게다가 단입도 골재를 사용할 경우 골재끼리의 Interlocking 즉, 골재의 맞물림 구조를 형성시켜 상부에서 발생하는 하중을 원활하게 전달시켜 소성변형 저항성 또한 향상시킬 수 있다.

이에 연구에서는 혼합골재가 아닌 단입도 골재를 적용하였으며, 조인트 포설 시 골재 사이에 binder가 완전히 충전되지 않을 수 있으므로 상부 하중의 적절한 분포를 위하여 하부에서 큰 골재를 시작으로 상부로 갈수록 작은 골재를 적용하여 높이 3cm씩 3회에 걸쳐 시공하였다.

KS F 2357 골재 중 단입도 골재는 3호부터 8호까지 있으며, 이중 가장 작은 크기의 골재로는 8호 골재, 7호 골재, 6호 골재이다. 각 골재의 입도를 Table 4.2에 나타내었다.

**Table 4.2** Grading of aggregate (KS F 2357)

골재 번호	체의 호칭 치수mm 입도범위mm	각 체를 통과하는 무게 백분율 %						
		25	20	13	10	5	2.5	1.2
6	20~10	100	90~100	-	20~55	0~10	0~5	-
7	13~5	-	100	90~100	40~70	0~15	0~5	-
8	10~2.5	-	-	100	85~100	10~30	0~10	0~5

그러나 KS F2357의 6호 골재의 경우 20mm~10mm의 사이의 골재로서, 10mm 이하의 골재가 최대 55%에서 최소 20%포함된다. 따라서 binder가 충전될 공간을 확보하기가 어렵다. 이에 KS F 2357에서 규정한 단입도보다 더욱 엄격한 입도를 선정하였으며, Table 4.3은 제안된 입도를 나타낸 것이다. 선정된 입도는 향후 범용적인 적용을 위하여 현재 석산에서 생산되고 있는 입도를 사용한 것으로, 제한적이기는 하나 쉽게 구할 수 있는 골재이다.

**Table 4.3** Suggested grading of aggregate

골재 번호	체의 호칭 치수mm 입도범위mm	각 체를 통과하는 무게 백분율 %						
		25	20	13	10	5	2.5	1.2
A6	19~14	100	90~100	5~30	0~5	-	-	-
A7	14~11	-	100	90~100	5~30	0~5	-	-
A8	11~6	-	-	100	90~100	5~30	0~5	-

binder의 경우 종류에 따라 쓰이는 곳도 다르고 특성도 다르게 나타나기 때문에, 각각 다른 binder를 사용하여 BFLJ system의 영향을 평가하였다. 비록 현실적으로 하부 시스템에 맞추어 특정 상부 재료를 적용하기에는 어려움이 있지만, 매설형이라는 특성상 상부재료의 특성에 따라서도 신축이음장치의 내구성 및 수

명이 달라질 수 있다. 이에 본 연구에서는 기존 연구에서 주로 사용된 Superphalt와 I-phalt 외에 조인트용으로 사용되어지는 Sealant를 사용하였으며, 외국에서 사용되어지는 Techcrete를 추가로 사용하여 상부포장 재료에 따른 영향을 평가하였다. Table 4.4와 Table 4.5는 본 연구에 사용된 binder에 대한 물성치를 나타낸 것이며, Table 4.6은 Techcrete의 물성치를 나타낸 것이다.

Techcrete는 콘크리트 보수재로 주로 사용되는 재료로 아스팔트 혼합물과 달리 골재와 binder의 구분이 없으며, flexible한 성질을 가지고 있는 polymer이다. resin(열가소성 수지)과 골재가 함께 섞여 있으며, 현장에서 가열하여 다짐 없이 적용 가능한 재료이다. Type R과 Type TBR로 나누어지고, Type R은 미세한 크기의 혼합재로 이루어져 있으며 20mm 정도의 깊이로 사용되며 Type TBR은 좀 더 큰 혼합재로 이루어지며 20~200mm 깊이에서 사용된다.

**Table 4.4** Properties of Superphalt and I-phalt

Parameter	Superphalt	I-phalt
Performance Grade	76-22	82-22
침입도	53	17
연화점 (°C)	87.5	94
신도 (25°C, cm)	58	51
회복탄성도 (%)	29	14
박막가열 후 질량변화율 (%)	0	0.2
박막가열 후 침입도비 (%)	88.7	85.4

**Table 4.5** Properties of Sealant

Parameter	Sealant
Temperature Performance Limit	64-28
Cone Penetration	50-90
Flow (60°C)	0.5 cm
Resilience (25°C)	25-60%
Ductility (25°C)	40cm min
Compression Recovery	0.4 min

**Table 4.6** Properties of Techcrete

Parameter	Type R	Type TBR
Flow Test (5hrs@60°C)	3mm max	3mm max
Slump Test(cone) 3hrs@70°C	5% max	5% max
Newton Force Extension	750N max. 80% min	650N max. 50% min
Compression Resistance 10mm/min	3500 N min. @50% compression	5000 N min. @25% compression
Specific Gravity	2	2.2
Softening Point	100°C min	110°C min

상부 포장 재료는 온도에 따라 시공성능이 달라질 수 있다. 너무 높으면 binder의 성능이 저하되어 탄성을 잃을 수 있으며, 너무 낮으면 골재 사이에 binder가 완전히 충전이 되지 않아 성능이 떨어질 수 있다. binder의 종류에 따라 적정 온도 및 최대 가열 온도가 규정되어 있으며, 대부분의 binder는 200~210°C가 최대 온도로 정해져 있다.

현재 개발된 binder의 경우 220°C 이상으로 온도를 증가시킬 시 연기가 발생하여 역청의 변형이 발생하므로, 180~190°C로 제작하였다. 또한 실험실 또는 현장에서 시공 시, binder의 온도보다 골재의 온도가 급격히 저하되는 것을 감안하여

골재온도를 좀 더 높여 180~200℃로 가열하였다.

### 3. 휠트랙킹 실험(Wheel Tracking Test)

#### 1) 실험 개요

국내 아스팔트 도로에서 가장 심각한 문제로는 rutting(바퀴자국)과 shoving(밀림) 현상을 들 수 있는데, 특히 rutting 현상은 최근에 주로 발생하는 파손 형태로서 외기 온도 변화에 따른 원인보다도 급증하는 교통량과 차량의 중량화 그리고 대형화에 따라 더욱 심화되고 있다. 이는 우리나라뿐만 아니라 전 세계적인 추세이며, 따라서 양질의 포장체를 구성하기 위한 제조 기술 및 시공 기술 개발이 절실하다.

현재 도로 포장용 아스팔트 콘크리트 혼합물의 배합 설계 방법으로 마샬 안정도를 이용하고 있으나, 이 수치는 경험에 의한 기준 값으로서 아스콘 포장체에서 요구되는 Crack resistance, Rut resistance, Workability, Durability 등을 만족시키는 매개 변수와 명확하게 연관시키기 어려운 점이 있어 미국아스팔트협회, 영국 규격 등 외국 규격에서 볼 수 있듯이, 최근의 아스팔트 콘크리트 혼합물 배합 설계에서는 마샬 시험보다는 현장 다짐 조건을 고려한 선회전 다짐 시험 방법을 적용시켜 공극률에 의한 배합 설계 방법을 채택하고 있다. 따라서 휠트랙킹 실험은 국내 아스팔트 콘크리트 혼합물의 소성 변형에 대한 내유동성을 평가하기 위한 방법으로, 특히 도로 포장용 아스팔트 콘크리트 혼합물에 대한 품질의 안정성을 확보하기 위한 기준으로 적용할 수 있도록 하는 데 그 목적이 있다.

이 시험으로부터 얻어지는 결과는 비교적 단순한 침하깊이(rut depth)와 동적 안정도(dynamic stability)이지만 이것은 가해진 운하중, 바퀴의 크기, 폭, 접촉부의 재질, 왕복속도, 횡수 그리고 온도 및 수분조건 등에 따라 다양하게 나타날 수 있다. 따라서 대부분의 경우 이 시험은 여러 가지 조건을 모두 한가지로 고정하고 얻어지는 결과를 비교하여 혼합물의 상대적 우열을 가리는 방법으로 사용

된다.

특히 이로부터 얻어진 결과를 현장에서의 성능과 연관지어 어떠한 결정을 내리는 것은 쉽지 않아 아직 많은 연구의 여지가 있다. 실제 도로에서의 운하중과 환경조건은 너무나 다양하고, 그와 같은 조건을 모두 만족하는 실험을 할 수 없기 때문이다.

본 연구에서는 휠트랙킹 시험을 통해 차륜 하중에 대한 변형량으로 소성변형에 대한 상대적인 동적안정도를 예측함으로써 상부포장혼합물의 내구성을 평가하였으며, 실험 결과를 통해 이후 연구에서 사용할 상부포장 혼합물을 결정하였다. 실험 결과 측정된 변형량을 통해 변형 속도와 동적 안정도를 다음과 같이 예측할 수 있다.

- 변형 속도 : 변형량-시간 곡선에서 곡선이 거의 직선이 되는, 즉 변형률이 일정화되는 45분, 60분의 변형량을 측정하여 다음 식으로 구한다.

$$\text{변형속도(RD, mm/min)} = \frac{d_{60} - d_{45}}{15} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

여기에서  $d_{60}$  : 60분에서의 변형량(mm)

$d_{45}$  : 45분에서의 변형량(mm)

- 동적 안정도 : 공시체의 표면으로부터 1mm 변형하는데 소요되는 시험 차륜의 통과 횟수로서 다음 식으로 구한다.

$$\text{동적 안정도(DS, 회/mm)} = 42 \times \frac{t_2 - t_1}{d_2 - d_1} \times C \quad (\text{Eq. 4.2})$$

여기에서  $d_1$  :  $t_1$ (일반적으로 45분)에서의 변형량(mm)

$d_2$  :  $t_2$ (일반적으로 60분)에서의 변형량(mm)

$C$  : 크랭크에 의한 변속 구동형 시험기를 사용한 경우의  
보정 계수 = 1.0 (이외의 경우 비교 실험을 실시하여  
보정 계수를 산출하여 적용)

## 2) 시험체 제작 및 시험방법

본 연구에서는 상부포장혼합물의 내구성을 비교 평가하기 위해 기존 연구 중 실내 신축 시험에 사용되었던 Superphalt와 I-phalt, 그리고 도로봉합재 및 조인트용으로 사용되고 있는 sealant를 변수로 두어 세 가지의 binder를 실험하였다. binder별로 휠트랙킹 시험에 대한 시험성적서가 있는 경우도 있으나 본 연구에서는 일반 아스팔트 포장에 아닌 조인트용으로 binder를 사용하였으며, 신축을 담당하는 binder의 함량을 일반 아스팔트 포장보다 훨씬 많이 하였기 때문에 새로 휠트랙킹 실험을 하여 아스팔트 혼합물의 유동저항성을 평가할 필요가 있다.

다음 Fig. 4.4는 시험체 제작과정을 나타낸 것으로, binder 별로 30×30×10cm의 공시체 2EA씩 제작하였다. 공시체 제작은 매설형 신축이음장치의 조인트 시공방법과 유사하게 3층으로 나누어 1층에는 19mm골재를, 2층에는 13mm, 3층에는 10mm골재를 사용하였고, 각 층별로 골재를 넣은 후 binder를 부어넣는 방법으로 제작하였다. binder는 1, 2층에는 무게비로 1/4을, 3층에는 1/6을 사용하였다. 골재와 binder는 시험체 제작 전 180℃의 고온항온조에서 2시간 양생시켰으며, 이후 혼합물 다짐기(다짐기 온도 : 150℃)를 이용하여 30회 다짐(다짐속도 : 17~23cm/m)을 하여 15시간동안 상온에서 양생시켰다.

아스팔트 혼합물의 다짐은 본래 55회 다짐을 기준으로 하지만, 본 실험에서는 binder의 양이 많아 30회 다짐만으로도 충분한 다짐이 이루어져 더 이상 다짐이 이루어지지 않아 기준보다 적게 다짐하여 시험체를 제작하였다. Fig. 4.5는 본 실험에서 사용된 고온항온조 및 혼합물 다짐기를 나타낸 것이다.



(a) Specimen mold

(b) Specimen manufacture



(c) Compaction

(d) Completed specimen

**Fig. 4.4** Manufacture process for Wheel Tracking Test



(a) convection oven

(b) Tamper

**Fig. 4.5** Specimen manufacture equipment

도로교통연구원에서 실험하였으며 Fig. 4.6은 실험에 사용된 휠트랙킹 실험기

(TR-332S)이다. 고온에서의 아스팔트 혼합물의 유동저항성을 평가하기 위하여 시험기 내부 온도를 60℃로 하여 공시체를 6시간동안 다시 양생시킨 후, 공시체 표면 위에 차륜하중을 반복 재하하여 변형량을 측정하였다. 실험은 KS F 2374의 규격에 따라 60분 동안 차륜 하중이 42회/min(왕복 1,260회/hr)의 속도로 반복적으로 공시체 표면 위를 통과하며, 이때의 차륜 하중의 공시체 표면위의 주행거리는 23cm/회 이다. 시험에 사용된 차륜의 타이어 폭은 5cm이며, 공시체 표면에 닿게 되는 타이어 접지압은  $6.4 \text{ kgf/cm}^2(70\text{kg})$ 이다.

실험 시 변형량 측정은 최초에 차륜이 공시체 중심부를 통과할 때의 눈금을 원점으로 하여 1분, 5분, 15분, 30분, 45분, 60분이 경과한 때의 침하 깊이를 측정하여 기록하였다.

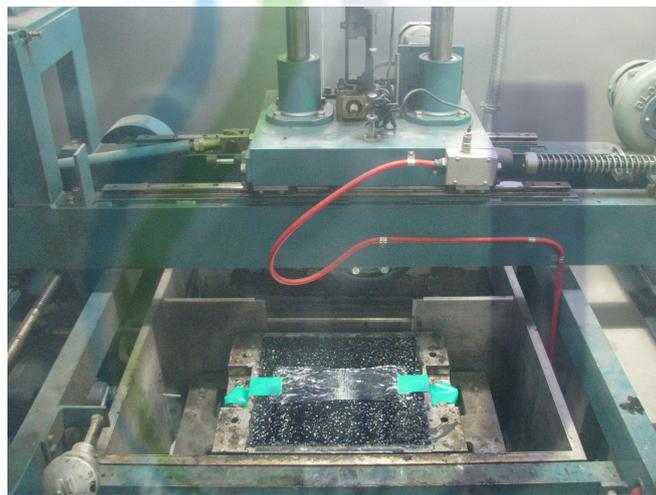


Fig. 4.6 Wheel Tracking Test Machine

#### 4. 고온(35℃)에서의 신축시험

##### 1) 실험변수

본 연구에서는 기존 매설형 신축이음장치인 APJ 시험체 3개와 개발된 매설형 신축이음장치 BFLJ 시험체 4개에 대하여 35℃에서의 상부 포장 재료에 따른 신

축 실험을 실시하였다.

실험 시 온도는 신축이음장치가 들어가게 될 RC교의 한랭지방이라 가정하여 Table 4.11의 도로교 설계요령에 따라 영상 35℃로 정하였다. Table 4.7과 Table 4.8은 실험변수를 나타낸 것이다.

**Table 4.7** Test parameters of APJ system

시험체명	철관 폭	실험 온도	binder
APJ I0	180 mm	10℃	I-phalt
APJ I35		35℃	I-phalt
APJ T35			Sealant

**Table 4.8** Test parameters of BFLJ system

시험체명	스터드 높이	실험 온도	binder
BFL I0	60mm	10℃	I-phalt
BFL I35		35℃	I-phalt
BFL T35			Sealant
BFL C35			Techcrete

## 2) 시험체 제원 및 제작

Fig. 4.7은 실험에 사용된 기존 APJ 및 개발된 BFLJ 시험체의 제원을 나타낸 것으로, 실제 교량과 같은 폭을 갖는 시험체를 제작하여 실험을 수행하였다.

시험체는 조인트의 유간을 60mm, 슬래브의 두께를 80mm, 총 크기를 가로 1100mm × 세로 600mm로 제작하였다. 시험체 내 조인트 크기는 외국의 경우 매 설형 신축이음장치의 폭을 500mm, 깊이를 100mm로 적용하고 있으나 본 연구에

서는 국내의 교량에 설치되어있는 조인트(300~400mm)의 보수 시를 고려하여 폭 400mm, 아스팔트 포장두께를 90mm로 제작하였다. 시험체는 슬래브 타설, 아스팔트 포설, 조인트 하부 시스템 설치 및 상부 포장재료의 포설 순으로 제작하였다.

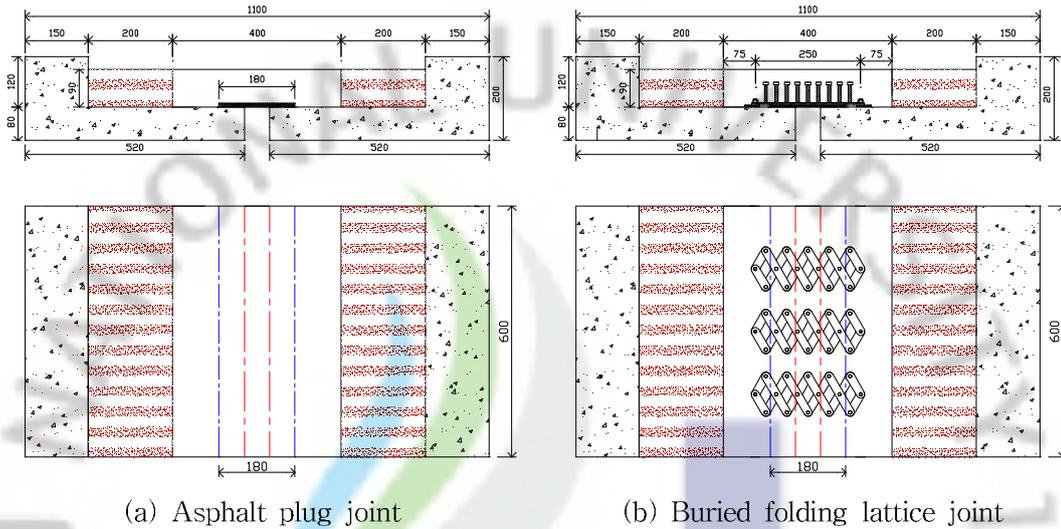


Fig. 4.7 Dimensions of specimens

(1) 슬래브

Fig. 4.8은 슬래브 제작 과정을 나타낸 것으로 유로폼을 사용하여 시험체를 제작하였다. 교량 상판에 해당되는 슬래브는 유로폼 내에 철근을 배근하고 콘크리트로 타설하였으며, 시험체 양 끝 단면에 4개의 24mm 전산 볼트를 설치하여 인위적으로 변위를 재하할 수 있도록 하였다.



(a) Reinforcing bars in uroform

(b) Curing of concrete

**Fig. 4.8** Manufacturing process of the slab

(2) 아스팔트 콘크리트

콘크리트 양생 이후 시험체 내에 조인트 폭 400mm를 남기고 아스팔트 콘크리트를 포설하였다. Table 4.9는 포설 시 아스팔트 배합비를 나타낸 것으로, binder는 AP-5(PG 64-22)를 사용하였으며 Filler는 보통 포트랜드 시멘트를 사용하여 제작하였다.

**Table 4.9** Mixture proportion of asphalt concrete

항목 구분	굵은 골재 (13mm)	잔골재 (8mm)	Filler (시멘트)	소 계	AP-5 (PG 64-22)
배합비	50%	48%	2%	100%	5.6%

높이 45mm씩 2층으로 나누어 아스팔트를 포설하였으며, 골재를 배합하고 가열하여 binder와 혼합한 후 포설하여 다짐하였다. 다짐 시 시험체의 크기가 작아 다짐기계의 적용이 불가능하여 햄머드릴에 다짐판을 부착하여 다짐을 실시하였다. Fig. 4.9는 아스팔트 콘크리트 포설 과정을 나타낸 것이다.



(a) Mixture and Heating



(b) Heating of binder



(c) Primer coating



(d) Mixing of aggregate and asphalt



(e) Compaction



(f) Completed specimen

**Fig. 4.9** Manufacturing process of the asphalt concrete

### (3) 조인트

조인트 제작 시 봉합재(스티로폼)를 유간 사이에 사용하여 binder가 유간 사이로 흘러들어 가는 것을 방지하였으며 그 위에 하부시스템을 설치하고, 이후 상부 포장 재료인 I-phalt와 Sealant, Techcrete를 재료 특성에 맞추어 다르게 제작하였다.

I-phalt와 Sealant를 사용한 시험체의 경우 아스팔트포장혼합물을 3층으로 나누어 층별 단입도 골재 (6~8호 골재 : 하부 19mm, 중부 13mm, 상부: 10mm)를 사용하여 골재를 가열하고, 가열한 역청을 매 층마다 부어 메우는 방식으로 조인트를 제작하였다. 이때 상부포장혼합물 포설은 상기(Table 4.3)에서 제안한 골재를 바탕으로 Table 4.10과 같은 배합비를 사용하여 포설하였다. 이후 약간의 다짐을 실시하였다.

Table. 4.10 Mixture proportion of joint

항목 구분	굵은 골재 (19mm)	중간 골재 (13mm)	잔골재 (10mm)	binder		소 계
상부	-	-	83.3%	16.7%	층별 포화	100%
중부	-	80%	-	20%		100%
하부	80%	-	-	20%		100%

Techcrete를 사용한 시험체는 Techcrete를 200℃로 가열하여 녹여 부어넣는 방식으로 하여 조인트 높이를 60mm와 30mm로 나눠 2층에 걸쳐 포설하였다. Techcrete는 다짐이 필요 없는 재료이나 가열하는 온도가 높아 높이가 60mm까지는 한 번에 포설하고, 그보다 높을 경우 층을 나누어 포설한다. 1층 포설 이후 1시간 정도의 양생 시간을 가져 약간 굳게 한 이후 표면에 발생한 기포를 열을 가하여 제거하고 2층을 포설하였다. 2층 포설 후에는 표면을 편평하게 하고 기포를 제거하기 위해 약간의 손다짐을 하였다. Fig. 4.10은 조인트 제작 과정을 나타

낸 것이다.



(a) sealing of gap



(b) Installation of bottom system



(c) Primer coating



(d) Placing in the joint(Techcrete)



(e) Asphalt pavement(I-phalt)



(f) Completed specimen(Techcrete)

**Fig. 4.10** Manufacturing process of the joint

### 3) 신축량 산정 및 변위 재하속도 결정

#### (1) 신축이음장치 신축량 산정

신축 이음량 산정에 관한 국내의 설계기준에는 도로교 설계기준과 한국도로공사의 도로 설계요령으로 크게 두 종류가 있다. 도로 설계요령에서는 신축장이 100m 이상인 경우에는 도로교 설계기준과 같은 방법으로 설계 신축량을 산정하도록 하고 있으며, 신축장이 100m 미만인 경우에는 신축량을 신축을 일으키는 연장의 함수로 교량형식에 따라 경험식에 바탕을 둔 별도의 간편식을 이용하여 산정하도록 하고 있다.

- 신축장 100m 이하 : 설치여유량(기본 신축량 × 20%)+ 부가여유량(10mm)
- 신축장 100m 이상 : 설치여유량(10mm)+ 부가여유량(20mm)

소교량의 경우, 도로교 설계기준에 따라 신축량을 산정하게 되면, 항상 설치 여유량과 부가 여유량을 고려해야 하기 때문에 신축량이 다소 크게 된다. 반대로 도로 설계요령에 따라 신축량을 산정하게 되면, 신축량이 작게 산출되어 신축이음장치의 규격이 불필요하게 커지는 것을 막아 경제적인 이점이 있는 반면, 시공시 대기온도 등의 영향을 고려하여 Presetting양을 산정하기 어려운 점도 있다.

본 연구에서는 도로 설계요령에 따라 신축량을 산정하였으며, 이는 신축량 산정에 관한 국내 및 일본 설계기준의 비교 결과 신축장이 100m 이하의 교량에서 도로 설계요령의 간편식을 사용하는데 문제가 없다고 판단한 기존 연구(한경대, 2002) 결과를 바탕으로 결정하였다.

한국도로공사의 설계요령에 제시되어 있는 신축량 산정식을 표로 정리하면 다음과 같다.

**Table 4.11** Design expansion length (도로 설계요령 6.2.3)

종 류 항 목		강 교		PSC교	RC교
		상로교	하로, 강상관교		
온도변화		(-20~+40℃) -10~+40℃	(-20~+50℃) -10~+50℃	(-15~+35℃) -5~+35℃	(-15~+35℃) -5~+35℃
신 축 량	온도변화	(0.6×1.2ℓ) 0.5×1.2ℓ	(0.7×1.2ℓ) 0.6×1.2ℓ	(0.5ℓ) 0.4ℓ	(0.5ℓ) 0.4ℓ
	건조수축	-	-	0.1ℓ	0.1ℓ
	크리프	-	-	0.2ℓ	-
	(기본신축량) 소 계	(0.72ℓ) 0.6ℓ	(0.84ℓ) 0.72ℓ	(0.8ℓ) 0.7ℓ	(0.6ℓ) 0.5ℓ
	신축여유량	(0.14ℓ +10) 0.12ℓ +10	(0.17ℓ +10) 0.14ℓ +10	(0.16ℓ +10) 0.14ℓ +10	(0.12ℓ +10) 0.10ℓ +10
	합 계	(0.86ℓ +10) 0.72ℓ +10	(1.01ℓ +10) 0.86ℓ +10	(0.96ℓ +10) 0.84ℓ +10	(0.72ℓ +10) 0.60ℓ +10

- 주1) 표에서 ( )는 한랭지방에 적용한다.
- 주2) 표에서 ℓ은 신축하는 거더의 길이(m)를 나타낸다.
- 주3) 강거더의 선팽창계수는  $1.2 \times 10^{-5}$ , 콘크리트 거더는  $1.0 \times 10^{-5}$ 으로 한다.
- 주4) 건조수축은 온도로 환산하여 20℃로 하고, 콘크리트 타설 후 신축장치 설치까지의 재령은 2~3개월로 생각하여 저감계수는 0.5로 한다.
- 주5) 일반적인 PS교에서 크리프는 프리스트레스에 의한 축응력  $f_p = 60 \text{ kg/cm}^2$ , 콘크리트 탄성계수  $E_c = 300,000 \text{ kgf/m}^2$ , 크리프계수  $\phi = 2$ 로 하고 저감계수는 프리스트레스 투입 후 2~3개월로 생각하여  $\alpha = 0.5$ 로 했다.
- 주6) 푸장 및 활하중에 의한 거더단부의 회전 및 시공오차로 인한 신축변화량은 여유량을 예상하여 기본신축량의 20%에 일률적으로 10mm를 더하는 것으로 한다.
- 주7) 특히 연약지반상의 구조물에 수평이동이 예측되는 경우는 이 이동량을 신축량으로 예상해도 좋다.

신축 실험 시 신축량은 한랭 지방의 신축장이 50m인 RC교로 가정하고 도로 설계요령의 내용을 바탕으로 다음과 같이 계산하였다.

- 온도범위(한랭지방) = 50℃(-15 ~ +35℃)
- 콘크리트 거더의 선팽창계수 =  $1.0 \times 10^{-5}$
- 신축하는 거더의 길이 = 50m
- 저감계수 : 0.5

$$\text{신축량(기본신축량 + 여유량)} = 0.72l + 10$$

$$= 0.72 \times 50 + 10 = 46\text{mm}$$

$$\therefore \Delta l = \pm 23\text{mm} \Rightarrow \text{신축실험시 극한치 고려: } \pm 25\text{mm}$$

## (2) 변위 재하속도 결정

Fig. 4.11은 미국에서 생산되고 있는 APJ 재료의 시험편들에 특정 변형을 재하 후 시간에 따른 하중의 추이를 나타낸 것이며, Fig. 4.12는 매설형 신축이음장치의 재료 구성비와 유사한 64%의 골재 부피 비를 갖는 아스팔트 혼합물에 대한 응력-변형률 곡선으로 하중속도에 따른 응력 변형률 관계를 나타낸 것이다.

본 연구에서는 두 그래프의 결과를 바탕으로 기존 Hong S. H.의 연구에서와 같이, 재하 시 변위속도는 스크류 잭의 감속비와 하중속도에 따른 응력 변형률을 고려하여 25mm/1hr(0.000017361 strain/sec)로 결정하였다. 또한 재료의 Relaxation을 고려하여 변위 재하 후 15분 내에 상부 포장재료가 안정된다고 가정하고 25mm 변위 재하 후 15분의 안정시간이 경과 후 신축에 따른 데이터를 측정하는 방법으로 실험을 수행하였다.

### Asphalt Plug Joint Relaxation

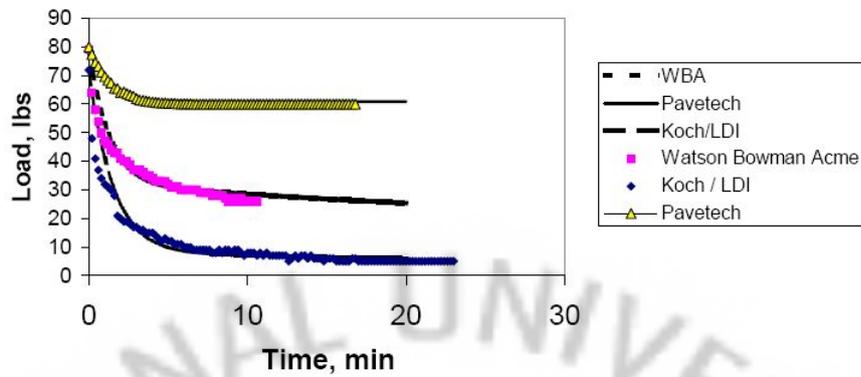


Fig. 4.11 Relaxation test results of APJ at 2°C (Bramel et al, 1999)

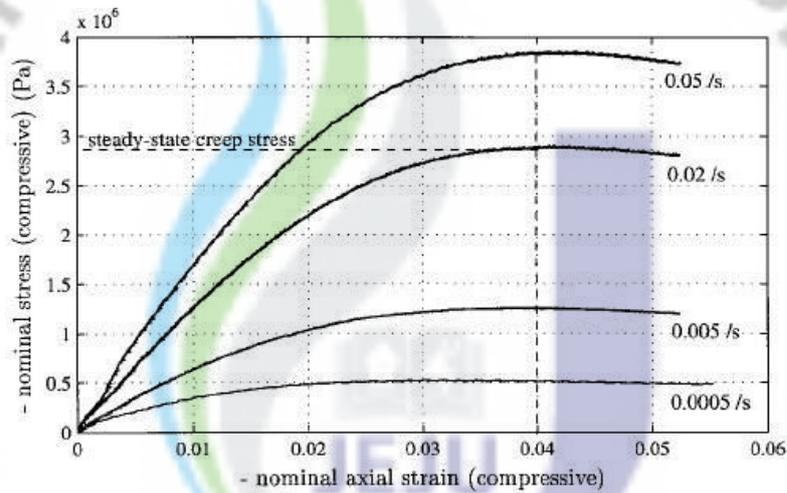


Fig. 4.12 Stress-strain curves of asphalt mixture with aggregate volume fraction of 64% (Deshpande and Cebon, 2000)

#### 4) 실험 방법

Fig. 4.13(a)에서와 같은 가로 2.7m × 세로 1.5m × 높이 2m의 단열재로 만든 챔버 내에서 실험하였으며, 실험 시 온도는 Fig. 4.13(b)와 같은 온풍기를 이용하여 35°C를 유지하였다. 실험 전 챔버 내의 온도를 35°C로 유지하면서 시험체를 6 시간동안 놔둔 후 실험을 실시하였다.



(a) Chamber for test

(b) Hot blast heater

**Fig. 4.13** Test equipment

실험 시 콘크리트의 건조수축과 온도변화, 활하중 등에 의한 상부구조의 변형에 의하여 발생하는 신축은 Fig. 4.14와 같은 스크류 잭을 이용하여 재하 하였다. 스크류 잭은 감속비가 1:24(10mm/24바퀴)이고 용량이 15ton으로, 스크류 잭에 자동 감속 장치를 부착하여 시험체에 변위를 재하 하였다. 상기에서 계산된 신축량을 바탕으로 인장(25mm) → 복원(압축)25mm → 압축 25mm → 복원(인장) 25mm 순으로 이를 1Cycle로 정하여 총 3Cycle에 걸쳐 신축시험을 실시하였다.



**Fig. 4.14** Screw jack

Fig. 4.15는 실험 전 시험체의 모습을 나타낸 것으로, 변위 재하는 슬래브 제작 시 만들어 놓은 전산볼트를 스크류 잭과 시험대에 고정하여 변위를 재하 하였다.

변위재하 시 시험체에 발생하는 총 변위를 측정하기 위해 다이얼 게이지를 설치하였으며, 신축에 따른 기존시스템과 새로 개발한 시스템의 표면 변형률 분포를 측정하기 위하여 크랙 측정용 디스크를 아스팔트콘크리트와 조인트를 포함한 시험체 표면에 40mm 간격으로 부착하였다.



Fig. 4.15 Real view of test set-up

## 5. 율하중 실험

### 1) 실험 개요

본 연구는 기존 매설형 신축이음장치의 문제점인 응력 집중을 해소하기 위하여 개발된 BFLJ system의 차량 하중에 따른 거동을 분석하여 실제 사용을 위한 내구성을 평가하고자 실시하였다. 고속도로현장에 신축이음장치 적용을 위해 도로교통기술연구원에서 포장가속시험을 통해 단기간에 과학적 방법에 의한 포장 공용성을 평가하고자 하였다.

한국도로공사의 포장가속시험기(KALES : Korea Accelerated Loading and Environmental Simulator)는 우리나라 실정에 맞는 아스팔트 포장 및 콘크리트

포장 겸용으로 설계수명 20년의 콘크리트 포장의 공용성을 대략 8개월의 단기간 내에 평가할 수 있는 시험이다. 카트(Cart) 3대를 동시에 운행할 수 있으며 최대 속도 30km/h, 축 하중 18ton으로서 속도 및 하중 조절이 가능하고 운전자의 주행습관을 반영한 횡 방향운동(Lateral Wandering)효과를 줄 수 있다. Table 4.12에 포장가속시험기의 제원을 나타내었다.

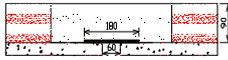
**Table 4.12** Performance of KALES

항 목	장 비 KALES	항 목	장 비 KAELS
카트 수	3	주행로 총 길이	99.5m
카트 당 축의 수	2	1회 주행시간	4.0초
축 당 타이어 수	2, 4	횡 방향 운동 (Lateral Wandering)	± 300mm
최대 총 중량	36ton	하중 부가 방법	Overhead crane
최대 축 중량	18ton	트랙 규모	48.3m × 24.3m
타이어 접지압력	10kg/cm <sup>2</sup>	카트(W×L×H)	5,800×4,900×3,250 (mm)
최대 주행속도	30km/h	안내 장치(W×L×H)	2,150×4,620×3,255 (mm)
정격 주행속도	20km/h		

## 2) 실험 변수

본 연구에서 제작한 시험체는 총 6개로 기존 매설형 신축이음장치인 APJ 시험체 1개와 제안된 매설형 신축이음장치 BFLJ 시험체 5개에 대하여 운하중 실험을 실시하였다. Table 4.13과 Table 4.14는 실험변수를 정리한 것으로, APJ 시험체의 경우 이미 현장에서 사용되는 시스템이므로 BFLJ 시험체와의 비교를 위해 한 개의 시험체만 제작하였다.

**Table 4.13** Test parameters of APJ system

실험번호	시험체명	조인트 폭	조인트 형상	binder
기본 시험체	APJ 0	400mm		I-phalt

**Table 4.14** Test parameters of BFLJ system

실험번호	시험체명	갭 폭	스터드 높이	binder
기본 시험체	BFLJ 0	60mm	60mm	I-phalt
스터드 높이	BFLJ 1		45mm	I-phalt
binder	BFLJ 2		60mm	Techcrete
갭 폭	BFLJ 3	85mm	60mm	I-phalt
갭 폭 및 스테드 높이	BFLJ 4		45mm	Techcrete

### 3) 시험체 제원 및 제작

본 연구에서는 Fig. 4.16과 같이 실험용 Pit(3.6m × 6m × 2m)에 교량상판에 해당하는 슬래브를 타설하고 Asphalt 포설 및 조인트 제작을 하였으며, 조인트 제작 시 실제 교량과 같은 폭을 갖도록 하여 6개의 시험체를 다음과 같이 제작하였다.

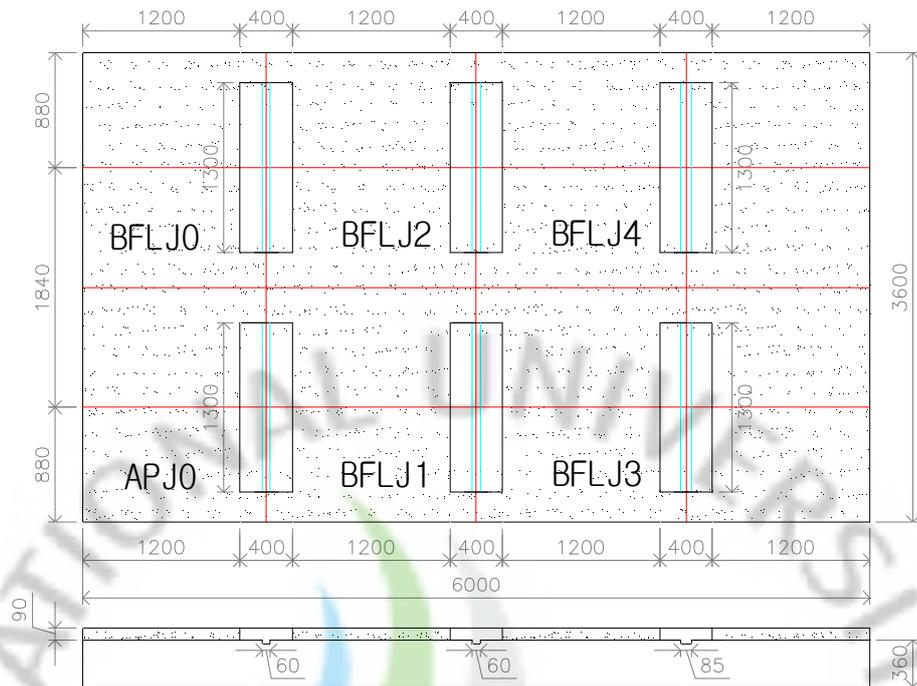


Fig. 4.16 Cross section for the test (unit: mm)

(1) 기초 및 슬래브

실험용 Pit의 높이는 2m로 바닥에서부터 1.55m까지는 노상 흙과 쇠석자갈로 노상 및 보조기층을 이루었으며, 본 실험 이전에 다른 실험들을 하면서 다짐은 충분히 이루어졌다고 판단하였다. 교량 상판에 해당하는 슬래브는 콘크리트로 타설하였으며, 보조기층 이후 200mm는 린콘크리트 슬래브로 기층을 이루었으며 이후 160mm는 호칭강도 30MPa의 보통 콘크리트로 타설하였다. 또한 슬래브 제작 시 콘크리트 슬래브 아래의 바닥판의 다짐이 잘 되어 있고 힘에 대한 영향은 받지 않을 것으로 판단되어 무근 콘크리트로 제작하였다.

Fig. 4.17은 조인트를 제작하기 위해 거푸집을 만든 것으로 콘크리트 타설 직후에 슬래브 표면에 찍어 눌러 설치함으로써 슬래브 표면에 겹 폭을 만들고, 아스팔트 포설 이후 조인트의 설치 위치 및 형상을 정확히 하기 위해 제작되었다. Fig. 4.18 슬래브 제작 과정을 나타낸 것이다.



Fig. 4.17 Foam for the joint



(a) Slab on grade

(b) Concrete placing

Fig. 4.18 Slab manufacture process

## (2) 아스팔트 콘크리트

Fig. 4.19는 아스팔트 콘크리트의 포설 과정을 나타낸 것으로, 아스팔트는 Superphalt(PG 76-22)를 사용하였으며 실제 교량에서 사용하는 것과 같이 최대 골재 13mm를 사용하여 9cm 높이로 포설하였다. 다짐은 타이어롤러와 콤비롤러를 사용하였으나, 다짐 이후 표면이 고르지 못하여 조인트와 조인트 사이에 약간 불룩하게 다짐이 되었다.



(a) primer coating

(b) Asphalt pavement



(c) Compaction

(d) Completed specimens

**Fig. 4.19** Manufacturing process of the asphalt concrete

### (3) 조인트

시험체는 조인트의 유간을 60mm와 85mm의 두 가지로 제작하였으며, 각 시험체 총 크기를 가로1300mm × 세로400mm × 높이90mm로 제작하여 교량의 신축이음부를 모사하였다. 조인트 제작은 신축 시험용 시험체를 제작할 때와 동일한 방식으로 제작하였으며, 상부 포장재료는 I-phalt와 Techcrete만을 사용하였다.

I-phalt를 사용한 시험체의 경우 포설 이후 1ton 다짐롤러를 사용하여 약간의 다짐을 실시하였으며, Techcrete를 사용한 시험체는 Techcrete 타설 이후 마감골재(보그사이트)를 얇게 뿌려주어 마무리하였다. Fig. 4.20은 조인트 제작 과정을 나타낸 것이다.



**Fig. 4.20** Manufacture process of joint

#### 4) 실험 방법 및 Data 측정

Fig. 4.21은 본 연구에서 사용된 포장가속시험기 KALES(Korean Accelerated

Loading and Environmental Simulator)를 나타낸 것으로, 차량하중에 대한 조인트의 거동을 평가하기 위한 시험 장비이다. 실험은 아래 그림에서와 같은 카트 3대가 각각 36ton, 31ton, 23ton의 하중으로 트랙을 20km/h의 속도로 돌면서 시험체의 표면을 지나가게 된다. 카트의 앞 축은 폭 30cm의 타이어 2개로 이루어졌으며, 뒤 축은 폭 30cm의 타이어 4개로 이루어졌다.



**Fig. 4.21** KALES (Korean Accelerated Loading and Environmental Simulator)

이 때 차량하중의 운용횟수에 맞춰 일정 횟수가 지난 이후 측정 장비를 이용하여 상부 포장면의 변형 및 조인트와 Asphalt의 단차를 측정하고, 육안으로 조인트의 파손상태를 확인하는 방법으로 조인트의 내구성을 평가하였다. Fig. 4.22는 시험체의 변형을 측정하기 위한 횡방향 프로파일러로, 5mm 간격으로 시험체 표면의 변형량을 측정하는 장비이다.



**Fig. 4.22** LASER profilometer

## V. 실험 및 결과 분석

### 1. 휠트래킹 실험 결과 및 분석

윤하중 시험에 앞서 상부포장 혼합물이 조인트에 사용되었을 시 차량하중에 대해 어느 정도 내구성을 가지고 견딜 수 있는지 알아보고, 이후 윤하중 시험 시 사용할 재료를 선정하기 위해 휠트래킹 실험을 실시하였다. 실험을 통해 반복주행으로 인한 바퀴 패임 깊이의 변화를 측정함으로써 아스팔트 혼합물의 동적안정도(Dynamic Stability)와 변형률(Rate of Deformation)을 결정하였다. Table 5.1은 각 시험체의 실험 결과로서 시간에 따른 수직 변형량을 나타낸 것이다.

Table 5.1 Results of Wheel Tracking Test

		Specimens				
		WT-S0 (Superphalt)	WT-I0 (I-phalt)	WT-I1 (I-phalt)	WT-T0 (Sealant)	WT-T1 (Sealant)
변 형 량 (mm)	1분	3.82	1.25	1.1	2.28	1.37
	5분	10.28	2	1.91	4.09	2.56
	10분	24.22	2.56	2.4	5.36	3.28
	15분	34.86	2.76	2.6	5.97	3.59
	30분	×	3.31	3.14	7.9	4.4
	45분	×	3.73	3.45	10.46	4.92
	60분	×	4.04	3.68	13.34	5.3

Superphalt를 사용한 시험체(WT-S0)의 경우 시험 시작 18분 만에 40mm의 패임이 발생하여 변형량이 대단히 커서 더 이상 측정이 불가능하였다. 시험 초기부

터 표면이 약간씩 출렁거리며 변형이 발생하였으며 이는 binder의 특성 외에도, 공시체 제작 시 binder를 부어 넣으면서 전체적으로 고르게 분포되지 않고 가운데로 좀 더 몰리게 된 것도 원인이라고 판단된다.

초기 1분간의 표면 변형량이 3.8mm로 패임이 많이 발생하면서 바퀴에 binder가 묻어 나오기 시작하였으며, 이후 골재 또한 binder와 함께 빠지는 현상이 발생되어 변형량이 크게 증가하였다. Fig. 5.1은 Superphalt의 실험 모습을 나타낸 것이다.

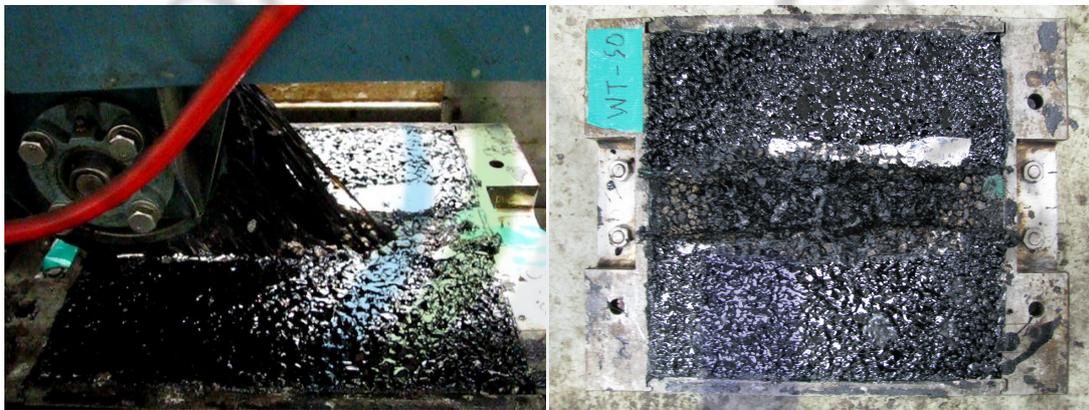


Fig. 5.1 Real view of Wheel Tracking Test (Superphalt)

반면 I-phalt를 사용한 시험체(WT-I0, I1)의 경우에는 초기 1분간의 표면 변형량이 1.1 ~ 1.25mm, 최종 시험 후의 변형량이 3.7 ~ 4.05mm 정도로 큰 변형을 일으키지 않았다. 또한 실험결과 동적 안정도(DS) 1970 ~ 2700(cycle/mm), 변형률(RD) 0.0153 ~ 0.0213(mm/분)으로 나타났다. Fig. 5.2는 I-phalt의 실험 모습을 나타낸 것이다.

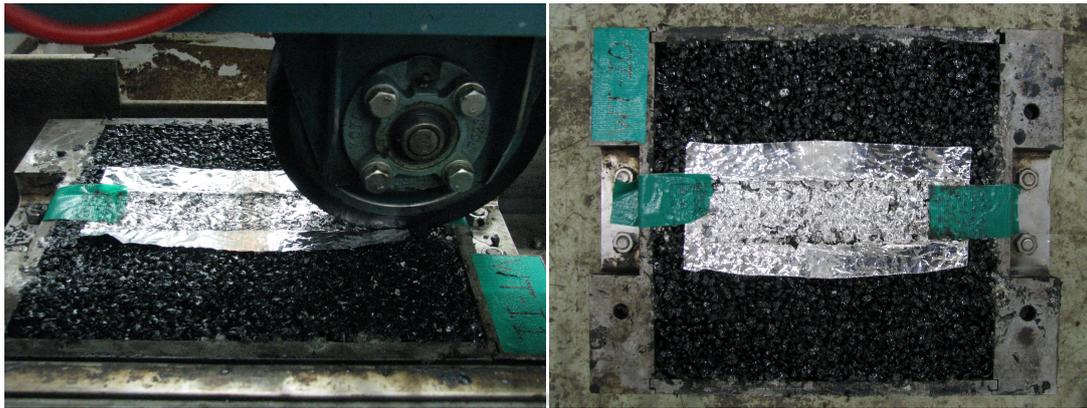


Fig. 5.2 Real view of Wheel Tracking Test (I-phalt)

Sealant를 사용한 시험체(WT-T1)는 초기 변형량이 1.4mm, 최종 변형량이 5.3mm, 동적 안정도(DS)는 1700(회/mm)로 나타났다. 그러나 같은 재료를 사용한 시험체(WT-T0)의 경우 초기 변형량이 2.4mm, 최종 변형량이 13.3mm, 동적 안정도(DS)는 225(회/mm)를 나타내었다. 두 시험체가 큰 차이를 보이는 원인은 WT-T0의 시험체의 경우 시험 도중 Superphalt를 사용한 시험체(WT-S0)와 같이 바퀴에 binder가 붙으면서 실험이 진행될수록 골재와 binder가 떨어져 나감으로서 변형량이 크게 증가한 것으로 판단된다. 이는 시험체 제작 과정에서 binder가 공시체 내에 골고루 분포되지 않고 가운데에 많이 분포되어 바퀴에 binder가 묻어 나오면서 골재도 같이 떨어져 나간 것으로 판단된다. Fig. 5.3은 Sealant의 실험 모습을 나타낸 것이다.

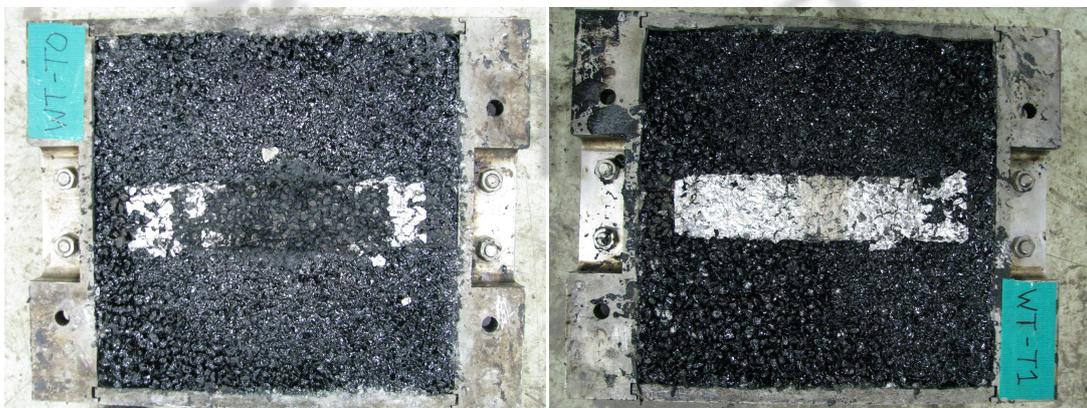


Fig. 5.3 Real view of Wheel Tracking Test (Sealant)

휠트래킹 시험 결과, Superphalt를 사용한 아스팔트혼합물은 윤하중에 대해 큰 변형을 나타내므로 조인트에 사용하기에는 부적합하다고 판단된다. 비록 시험 시 온도가 60℃로 binder가 완전히 굳어있는 상태도 아니고 휠트래킹 시험만으로 내구성을 판단할 수는 없지만, 시험 결과 너무나 큰 변형이 발생했기 때문에 본 연구에서는 제외하는 것이 낫다고 판단하였다. 반면 I-phalt를 사용한 아스팔트혼합물은 윤하중에 대해 내구성이 적합한 것으로 판단되며, 지속적인 차륜 하중에도 큰 변형을 나타내지 않아 조인트용 상부포장 재료로서 적합하다고 판단된다. Sealant를 사용한 아스팔트혼합물은 변형 및 내구성 측면에서 WT-T1 시험체의 경우 변형량 및 동적안정도(DS)가 I-phalt를 사용한 시험체와 큰 차이를 보이지 않았으나, 다른 시험체는 매우 큰 변형을 나타내었다. 따라서 이후 윤하중 시험에서는 콘크리트 보수재로 사용되는 Techcrete와 본 실험에서 가장 적합하다고 판단되는 I-phalt를 사용하려 한다. 다음 Fig. 5.4는 휠트래킹 시험 결과 시간에 따른 변형을 나타낸 것이다.

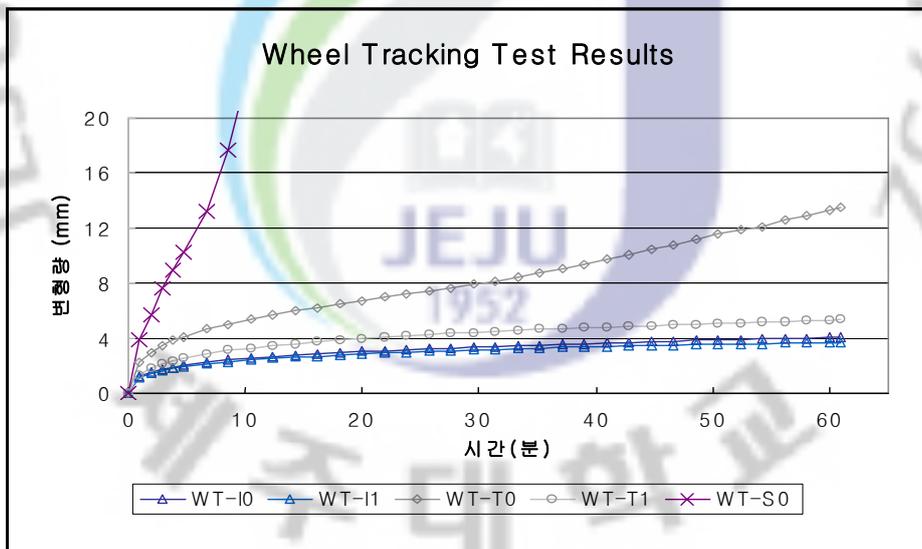


Fig. 5.4 Wheel Tracking Test Results

## 2. 고온(35℃)에서의 신축시험 결과 및 분석

본 연구에서는 조인트에 사용되는 상부 포장재료에 따른 신축 성능 평가를 위해 기존 연구를 바탕으로 시험체를 제작하여 신축 시험을 실시하였다. 실험 분석은 신축량 산정 기준에서의 온도를 바탕으로 APJ 및 BFLJ system에 따라 고온(35℃)에서의 상부 포장재료에 따른 영향을 살펴보았으며, 10℃에서 실험한 시험 결과와 비교분석하였다.

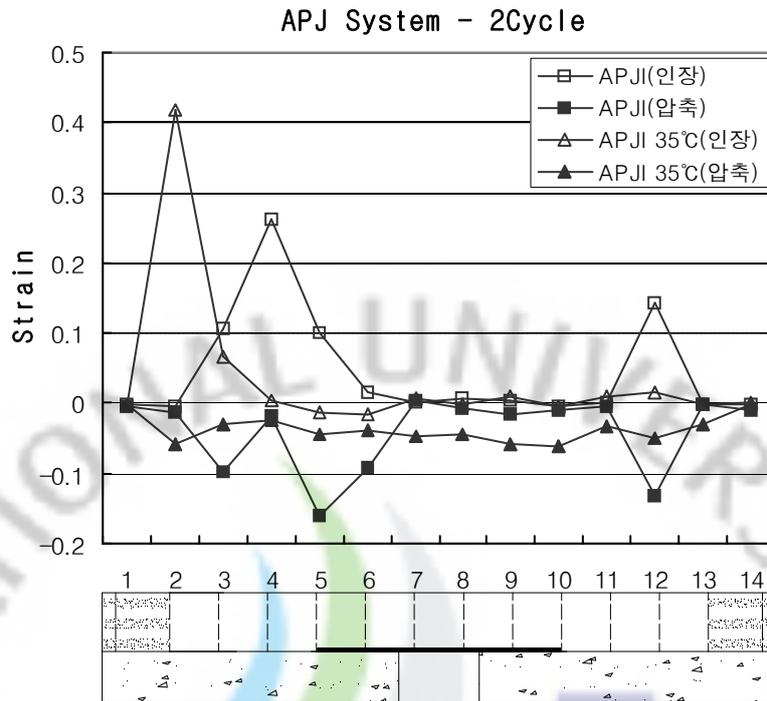
실험결과로부터 나타낸 그래프들은 본 연구에서 산정된 신축량  $\pm 25\text{mm}$ 를 바탕으로 인장 $25\text{mm}$ →복원(압축 $25\text{mm}$ )→압축( $25\text{mm}$ )→복원(인장 $25\text{mm}$ )을 1Cycle로 3Cycle에 거쳐 실험하여, Cycle에 따른 인장/압축 상태에서의 구간별 표면 변형률을 나타낸 것이다.

### 1) 기존 매설형 신축이음장치(APJs)의 온도에 따른 실험 결과 및 분석

기존 매설형 신축이음장치의 온도에 따른 영향을 분석하기 위하여 영상 10℃와 35℃에서 실험을 실시하였다. 시험체는 바닥철판의 폭을 180mm, 상부 포장재료는 I-phalt를 사용하였다.

Fig. 5.5는 두 시험체의 2Cycle 시 시험체 표면의 각 구간별 표면변형률을 나타낸 것이고, Fig. 5.6은 실험 후의 표면양상을 나타낸 것이다.

실험 결과 두 시험체 모두 1Cycle 인장 시부터 접합부에 변형 집중이 발생하였으며, 실험이 진행됨에 따라 접합부에 큰 변형이 발생하여 2Cycle 인장 시 아스팔트 포장면과 조인트 접합부에서 Debonding현상에 의해 파괴되었다. 영상 35℃에서 실험한 경우가 영상 10℃에서 실험한 시험체보다 접합부에서 더 높은 집중 변형을 보였으며, 이는 온도가 올라가면서 binder의 부착력이 떨어졌기 때문으로 판단된다.



**Fig. 5.5** Surface strain of APJ system



(a) Strain at surface (10°C)

(b) Strain at surface (35°C)

**Fig. 5.6** Real view of test result - APJ system

2) 기존 매설형 신축이음장치의 상부 포장재료에 따른 실험 결과 및 분석

기존 매설형 신축이음장치의 상부 포장재료에 대한 거동 분석은 I-phalt를 사용한 시험체(APJI 35°C)와 Sealant를 사용한 시험체(APJT 35°C)에 대하여 실험

시 온도를 35℃로 하여 실험하였다.

본 실험에 사용된 binder의 재료적인 성질은 IV.2절의 Table 4.4와 Table 4.5에 나타낸 물성치에서 알 수 있듯이 I-phalt의 경우 침입도가 낮고 연화점과 PG등급(82-22)을 볼 때 단단한 성질을 가지고 있으며 회복 탄성도 또한 일반 아스팔트보다 높은 재료임을 알 수 있다. Sealant의 경우 침입도가 비교적 낮고 PG등급(64-28)이 낮아 좀 더 연한 성질이며, 회복 탄성도를 높인 고탄성 재료이다.

Fig. 5.7은 두 시험체의 2Cycle 시 시험체 표면의 각 구간별 표면변형률을 나타낸 것이고, Fig. 5.8은 실험 후의 표면양상을 나타낸 것이다.

실험 결과 두 시험체 모두 접합부에 변형 집중이 발생하였으며, Sealant를 사용한 시험체의 경우 1Cycle 시에서는 양쪽 접합부에서 비슷한 변형이 발생하였으나, 2Cycle 인장 시 한쪽 접합부에서 큰 변형이 발생하면서 Debonding 현상에 의해 파괴되었다. 기존 매설형 신축이음장치는 신축에 대하여 상부 포장재료에 따라 변형 분포가 약간은 다르게 나타났으나, 인장균열과 접합부의 Debonding 현상에 의해 조기 파손되는 것을 알 수 있었다.

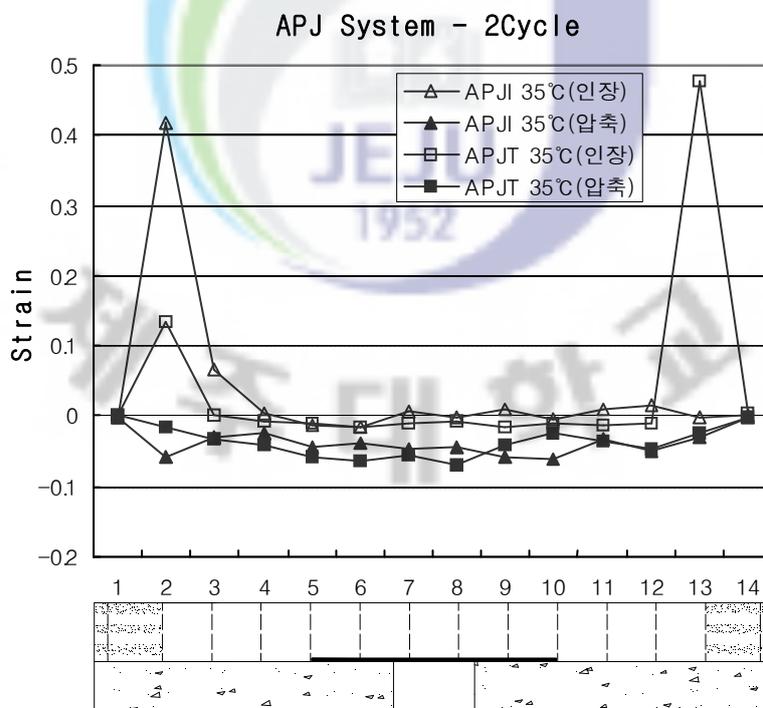
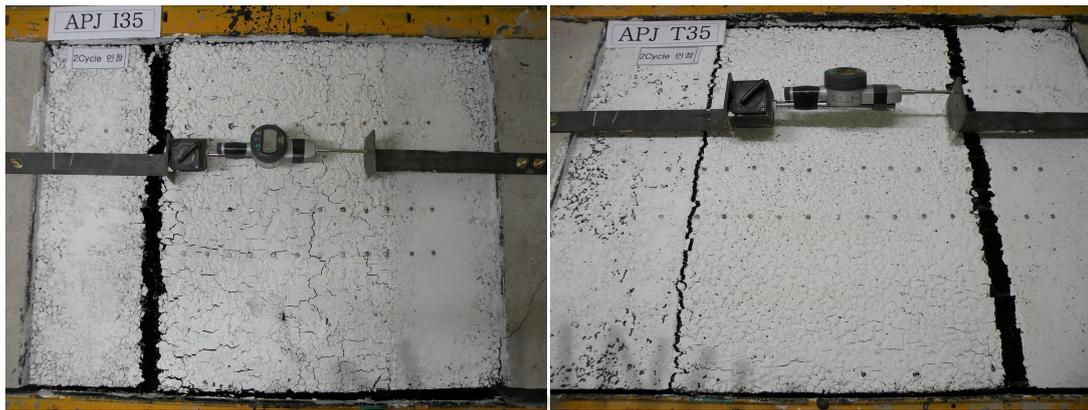


Fig. 5.7 Surface strain of APJ system



(a) Strain at surface (I-phalt)

(b) Strain at surface (Sealant)

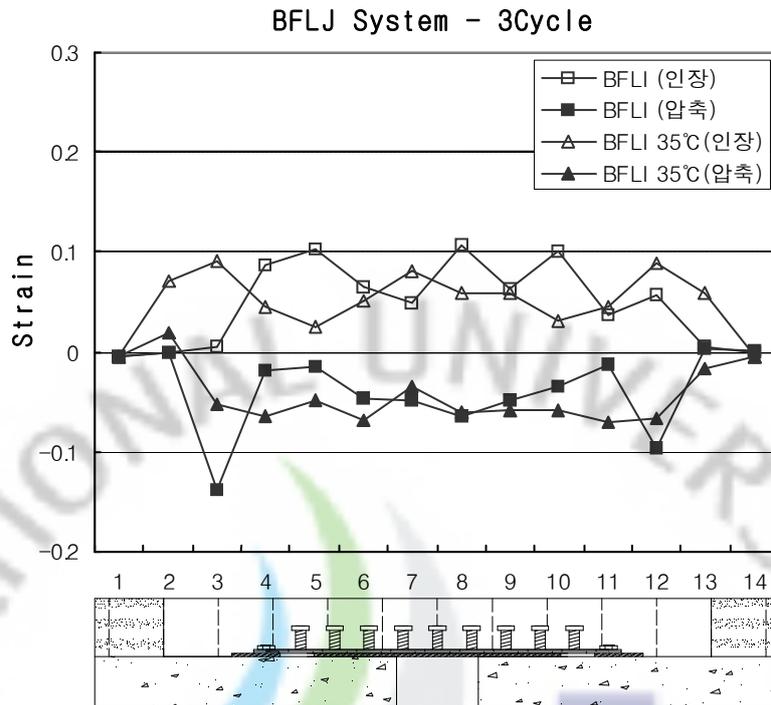
**Fig. 5.8** Real view of test result - APJ system

### 3) 개발된 매설형 신축이음장치(BFLJs)의 온도에 따른 실험 결과 및 분석

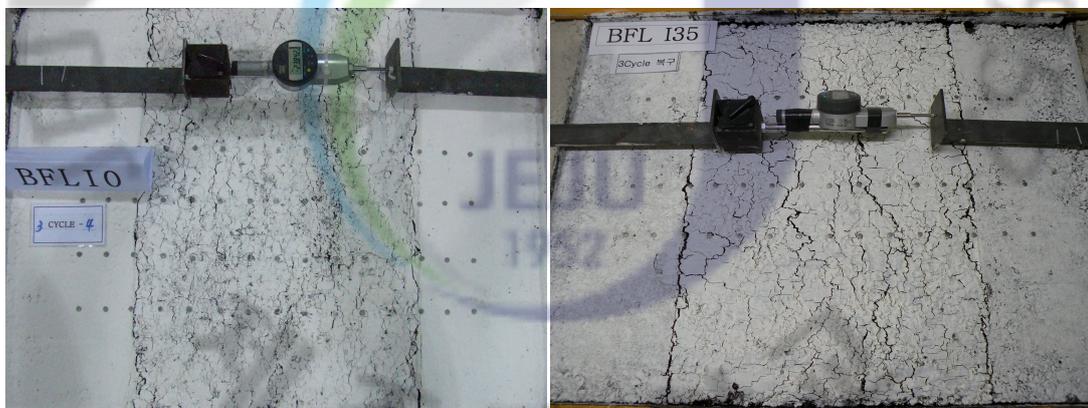
개발된 매설형 신축이음장치(BFLJs)의 거동 분석을 위하여 기존 매설형 신축이음장치(APJs) 하부에 Folding Lattice System을 설치하여 온도에 대한 영향을 살펴보았다. 스테드의 높이를 60mm, 상부 포장재료는 I-phalt를 사용하였으며 영상 10℃와 35℃에서 실험하였다.

Fig. 5.9는 두 시험체의 3Cycle 시 시험체 표면의 각 구간별 표면변형률을 나타낸 것이고, Fig. 5.10은 실험 후의 표면양상을 나타낸 것이다.

실험 결과 BFLJs는 인장과 압축 시 조인트 전체에 완만한 변형을 유도하였다. 이는 하부시스템인 Folding lattice system의 영향으로 조인트 전체에 강제적으로 고르게 유도하여 변형을 분포시킨 것으로 판단된다. 10℃에서 실험한 시험체의 경우 중앙부에 고른 변형을 유도하고 접합부에 다소 낮은 변형을 유도한 반면, 35℃에서 실험한 시험체는 접합부에서도 중앙부에서와 거의 비슷한 변형을 나타내었다. 하지만 기존 APJ system에 비해 두 시험체 모두 접합부에서의 변형률이 약 0.4에서 0.1 이하로 내려간 점을 고려했을 때, 온도 차에 의한 영향은 미비하다고 판단된다.



**Fig. 5.9** Surface strain of BFLJ system



(a) Strain at surface (10°C)

(b) Strain at surface (35°C)

**Fig. 5.10** Real view of test result - BFLJ system

4) 개발된 매설형 신축이음장치의 상부 포장재료에 따른 실험 결과 및 분석

상부재료에 따른 BFLJ system의 거동은 I-phalt를 사용한 시험체(BFLI)와 Sealant를 사용한 시험체(BFLT), 콘크리트 보수재인 Techcrete를 사용한 시험체

(BFLC)를 제작하여 실험을 실시하였다. Techcrete는 flexible한 성질을 가진 재료로, 아스팔트 혼합물과의 재료적 차이를 살펴보기 위해 실험하였다.

Fig. 5.11은 시험체의 3Cycle 시 시험체 표면의 각 구간별 표면변형률을 나타낸 것이고, Fig. 5.12는 실험 후의 표면양상을 나타낸 것이다.

실험 결과 I-phalt와 Sealant를 사용한 시험체는 조인트 전체적으로 고른 변형을 나타내었으며, 시험체 간 거의 비슷한 변형 분포를 나타내었다. 반면 Techcrete를 사용한 시험체의 경우 접합부에서의 변형이 다소 높았으며, 중앙부에서의 변형이 다른 재료를 사용한 시험체에 비해 상대적으로 낮았다. 이는 Techcrete가 flexible한 콘크리트 재료라 하더라도 하부에서 발생하는 강제적인 변위를 재료가 모두 흡수하지 못해, 표면에서 신축이 제대로 일어나지 않아 접합부에 다소 높은 변형이 발생된 것으로 판단된다.

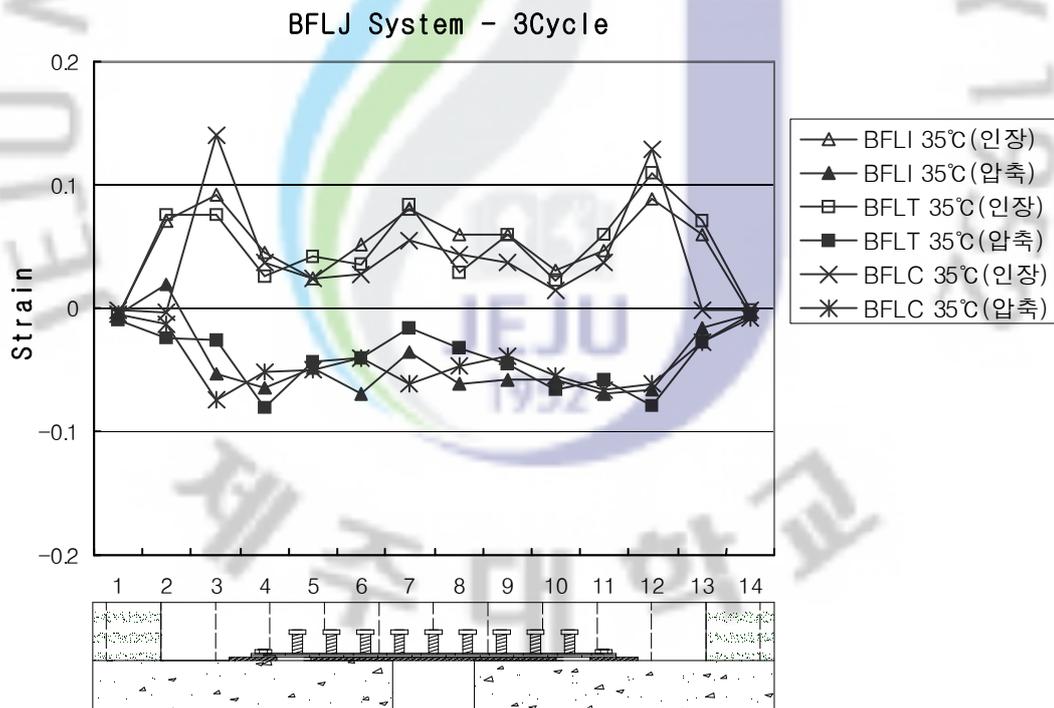


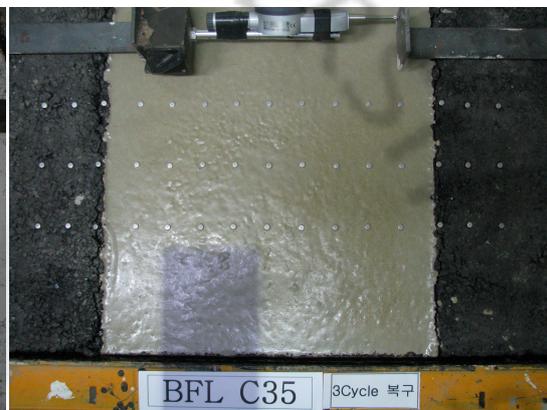
Fig. 5.11 Surface strain of BFLJ system



(a) Strain at surface (I-phalt)



(b) Strain at surface (Sealant)



(c) Strain at surface (Techcrete)

**Fig. 5.12** Real view of test result - BFLJ system

##### 5) 고온에서의 신축시험 결과

온도가 높아짐에 따라 접합부에서의 변형이 좀 더 높아짐을 알 수 있었으며, 이는 온도가 높아지면서 재료 자체의 부착력이 다소 떨어져 발생하는 것으로 판단된다. 그러나 온도 차이가 BFLJ system에 미치는 영향은 미비했으며, 조인트 전체적으로 고른 변형 분포를 나타내었다.

또한 하부 Folding Lattice System을 본 연구에서 양끝 고정철판을 없애고 와셔(Washer)를 사용하여 시험한 결과, 기존 연구에서와 같이 고른 변형을 유도하였으며 문제점을 찾을 수 없었다. 오히려 일체형이었던 하부 시스템을 분리해 놓음으로서 시공하기에도 용이하고, 보수 시에도 하부 시스템의 일부분만 보수가 가능해 더욱 편리할 것으로 판단된다.

### 3. 운하중 시험 결과 및 분석

신축이음장치의 차량 하중에 대한 내구성을 판단하기 위해 포장가속시험을 실시하였다. 시험체 위에 카트(Cart)가 일정 횟수를 지나가게 한 후, 측정 장비를 통해 조인트 표면의 종/횡 방향에서의 변형량을 측정하였으며, 육안을 통해 변형을 살펴보았다.

#### 1) 기존 매설형 신축이음장치 APJ0 시험체

APJ0 시험체는 차량 하중이 12,000회 지나간 이후 파괴된 것으로 판단되었다. 카트가 10,000번 지나갔을 때 조인트 내 바퀴가 지나간 부분에서 전체적으로 약 3mm 정도의 처짐이 발생하였고, 포장 재료의 골재가 binder와 함께 차량 바퀴에 약간 떨어져 나간 부분이 발생하였다. 이후 계속 시험을 진행하다보니 골재 탈락에 의한 조인트 내에 패임이 발생하여 12,000회에 파괴가 난 것으로 판단하였다. 파괴가 발생한 원인으로서는, 카트가 지나가면서 바퀴에 타이어 찌꺼기가 binder와 함께 묻어 나오기 시작하여 결국에는 골재까지 탈락하게 된 것으로 판단되었다. 더욱이 본 시험체의 경우 조인트 제작 이후 표면을 binder로 코팅하다보니 조인트 표면에 binder가 많아 빠른 조기파손에 이른 것으로 보인다. Fig. 5.13은 시험 결과를 나타낸 것으로, 파괴 시의 상태를 나타낸 것이다.



Fig. 5.13 Real view of test (APJ0)

Fig. 5.14는 조인트의 종방향(차량 진행 방향)에서의 표면 변형을 나타낸 것이며, Fig. 5.15는 조인트의 횡방향(시험체 가로 길이 1300mm)에서의 표면 변형을 나타낸 것이다. 양 쪽의 굵은 선은 조인트와 아스팔트 콘크리트 포장의 경계부를 나타낸 것이다. Fig. 5.15에서 10,000회 때 초기보다 변형량이 상승한 부분은 차량이 지나가면서 binder가 솟아오른 부분으로, binder의 함량이 너무 많아 발생한 현상으로 보인다.

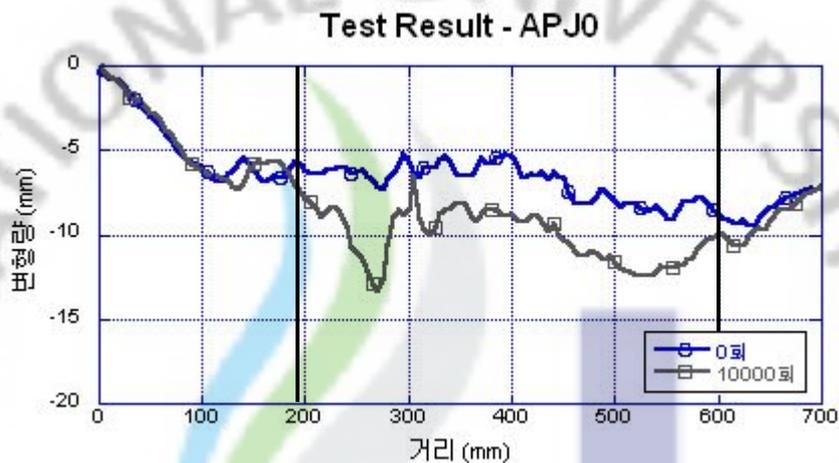


Fig. 5.14 Longitudinal test result of APJ0

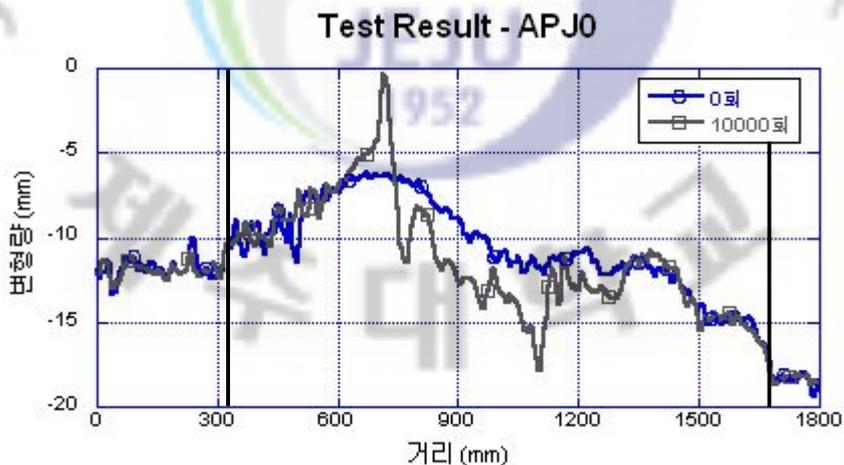


Fig. 5.15 Lateral test result of APJ0

## 2) 개발된 매설형 신축이음장치 BFLJ0 시험체

겉 폭이 60mm에 스테드의 높이가 60mm인 개발된 BFLJ system의 기본 형상으로, binder는 I-phalt를 사용하였으며 APJ0 시험체와 마찬가지로 표면에 binder로 코팅한 시험체이다. Fig. 5.16은 12,000회 때의 모습을 나타낸 것으로 차륜이 접하는 상부표면에 골재 탈락이 발생하여 파괴되었다.

파괴가 발생한 원인으로서는 앞의 APJ0 시험체와 같이 표면에 binder 함량이 많아 카트(Cart)가 지나가면서 binder와 골재가 바퀴면에 붙어 떨어져 나간 것으로 판단되었다. 조인트 표면에 binder로 코팅한 이유는 좀 더 표면을 매끄럽게 하기 위함이었는데 오히려 조기 파손의 원인이 되어, 표면 처리는 binder보다는 모래와 같은 마감재를 사용하는 것이 더 나을 것으로 판단된다.



Fig. 5.16 Real view of test (BFLJ0)

Fig. 5.17과 Fig. 5.18은 조인트의 종/횡 방향에서의 표면 변형을 나타낸 것으로, 10,000회 때 최대 처짐은 2.95mm, 바퀴가 지나간 곳에서 평균적으로 2.4mm 처짐이 발생하여 전체적으로 큰 처짐이 발생하지는 않았다.

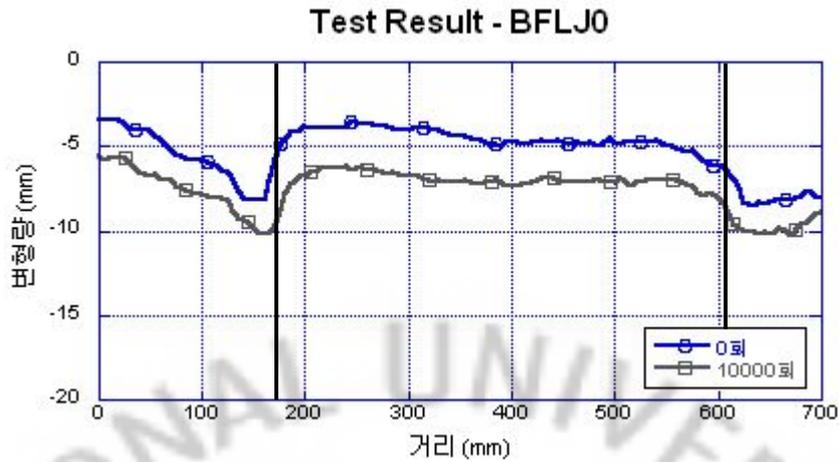


Fig. 5.17 Longitudinal test result of BFLJ0

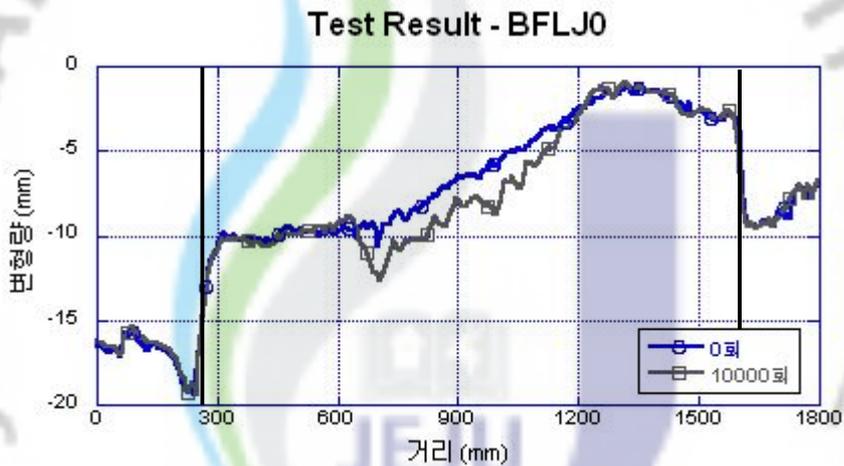


Fig. 5.18 Lateral test result of BFLJ0

### 3) BFLJ1 시험체 - 스테드 높이 45mm

개발된 BFLJ system의 스테드 높이는 60mm로, 이는 기존 연구에서 45mm와 60mm 높이의 스테드에 대해 신축 실험하여 나온 결과이다. 하지만 내구성 측면에서 취약하여 스테드가 파괴될 수도 있다는 판단이 들어 스테드 높이를 45mm로 줄여 실험하였다.

Fig. 5.19는 20,000회에서 시험체 상태를 나타낸 것으로 파괴되지는 않았으나, 조인트 표면에서 binder가 바퀴에 쓸려나가 골재 표면이 하얗게 보이는 부분

이 나타났다. 바퀴가 지나간 부분에서 10,000회 때 전체적으로 초기보다 약 2.95mm의 처짐이 나타났으며 이때의 최대 처짐은 4.79mm 발생하였다. 이후 20,000회 때 전체적으로 초기보다 4.76mm의 처짐이 발생하였으며 최대 처짐은 7.28mm 발생하였다. 초기 10,000회 때보다 변형이 훨씬 적게 일어난 것을 알 수 있으며, 아스팔트 혼합물이 초기에 차량 하중에 의해 다짐 효과를 받게 되어 변형이 많이 발생했지만 실험이 계속될수록 추가적인 처짐량이 급격히 줄어들어 변형이 거의 발생하지 않을 것으로 판단된다.

스터드 높이에 대해서는 현재까지는 60mm 높이의 스테드를 사용해도 무방하다고 판단된다. 이는 앞의 BFLJ0 시험체의 표면 골재 탈락에 의한 파괴가 발생한 이후 상부 아스팔트 혼합물을 제거하여 하부 시스템의 손상 여부를 살펴보았으나, 별다른 문제점은 찾아볼 수 없었기 때문이다. 하지만 BFLJ0 시험체의 경우 12,000회만 실험한 경우로, 이후 계속된 실험에 의해 하부 시스템에 손상이 발생할 수 있으므로 추후 실험이 완전히 종료된 이후에도 살펴보아야 할 것으로 판단된다. Fig. 5.20과 Fig. 5.21은 조인트의 종/횡 방향에서의 표면 변형을 나타낸 것이다.



Fig. 5.19 Real view of test (BFLJ1)

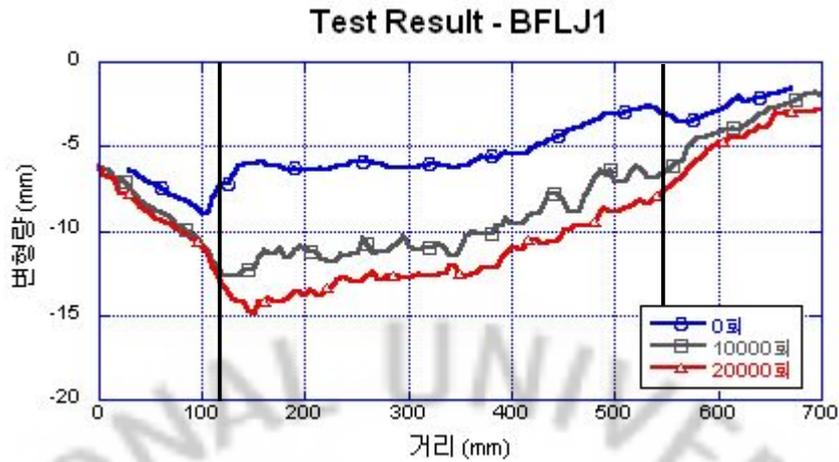


Fig. 5.20 Longitudinal test result of BFLJ1

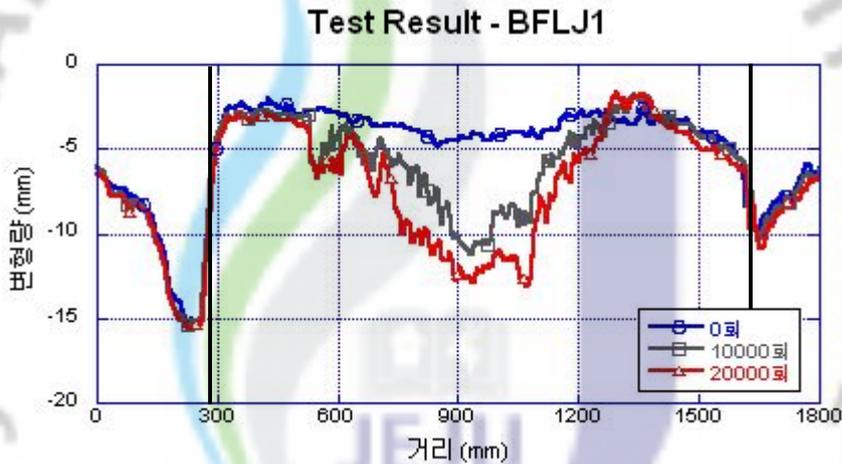


Fig. 5.21 Lateral test result of BFLJ1

#### 4) BFLJ2 시험체 - 상부 포장재료 Techcrete

상부포장 재료에 따른 영향을 알아보기 위한 시험체로 상부 포장 재료로 Techcrete를 사용하였다. Fig. 5.22는 20,000회에서 시험체 상태를 나타낸 것으로 파괴되지 않았다. 바퀴가 지나간 부분에서 10,000회 때 전체적으로 초기보다 약 5.57mm의 처짐이 나타났으며 이때의 최대 처짐은 7.27mm 발생하였다. 이후 20,000회 때 전체적으로 초기보다 6.61mm의 처짐이 발생하였으며 최대 처짐은 8.73mm 발생하였다. Techcrete를 사용한 시험체의 경우 I-phalt를 사용한 시험체

보다 큰 변형을 나타내었으며, 이는 Techcrete 재료의 경우 골재 크기가 작아 아스팔트 상부 포장 혼합물에 비해 골재 사이의 맞물림에 의한 강성이 작기 때문인 것으로 판단하였다.

또한 조인트와 아스팔트 포장 접합부에서 아스팔트 포장의 균열 현상이 발생하였다. 이는 조인트의 접합부 부근에서 침하가 많이 발생하면서, 아스팔트 포장면에 카트 바퀴에 의한 충격이 많이 가해졌기 때문으로 판단되었다. Fig. 5.23과 Fig. 5.24는 조인트의 종/횡 방향에서의 표면 변형을 나타낸 것이다.



Fig. 5.22 Real view of test (BFLJ2)

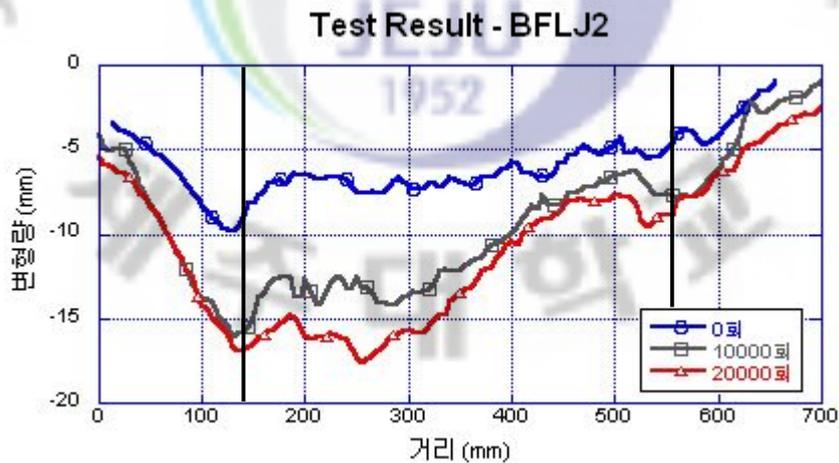


Fig. 5.23 Longitudinal test result of BFLJ2

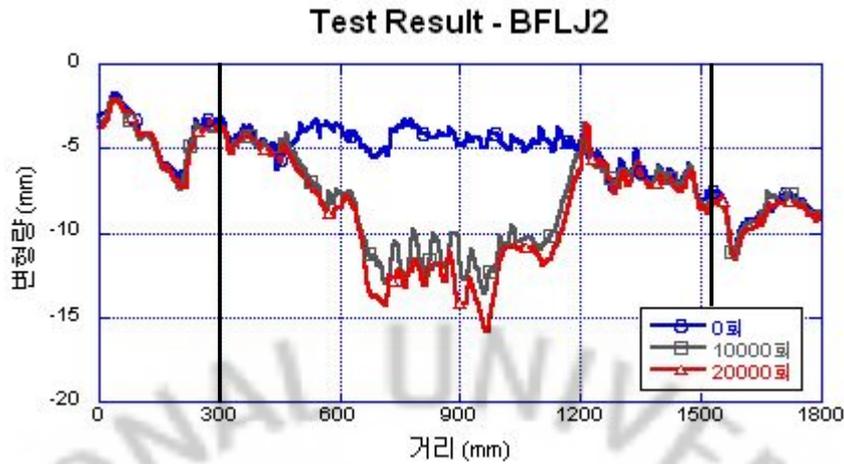


Fig. 5.24 Lateral test result of BFLJ2

5) BFLJ3 시험체 - 겹 폭 85mm

겨울철 콘크리트 슬래브의 온도에 의한 수축으로 신축이음장치의 겹 폭은 넓어지게 된다. 실제 겹 폭에 대한 영향은 크지 않을 것으로 판단하였으나, 본 연구에서는 겹 폭에 따른 영향을 알아보기 위해 겹 폭을 60mm에서 85mm로 제작하여 실험하였다.

Fig. 5.25는 20,000회에서 시험체 상태를 나타낸 것으로 파괴되지 않았고 변형도 크게 발생하지 않았다. 바퀴가 지나간 부분에서 10,000회 때 전체적으로 초기보다 약 3.17mm의 처짐이 나타났으며 이때의 최대 처짐은 4.02mm 발생하였다. 이후 20,000회 때 전체적으로 초기보다 4.35mm의 처짐이 발생하였으며 최대 처짐은 5.93mm 발생하였다. 이는 상부 포장 혼합물을 같은 재료를 사용한 BFLJ1 시험체와 거의 비슷한 결과로, 겹 폭이나 스테드 높이에 대해 운하중에 대한 영향은 크지 않은 것으로 판단되었다. Fig. 5.26과 Fig. 5.27은 조인트의 종/횡 방향에서의 표면 변형을 나타낸 것이다.



Fig. 5.25 Real view of test (BFLJ3)

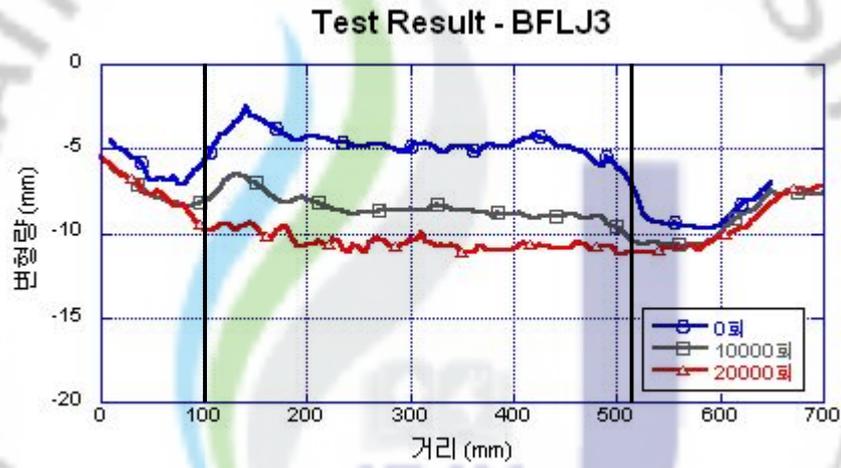


Fig. 5.26 Longitudinal test result of BFLJ3

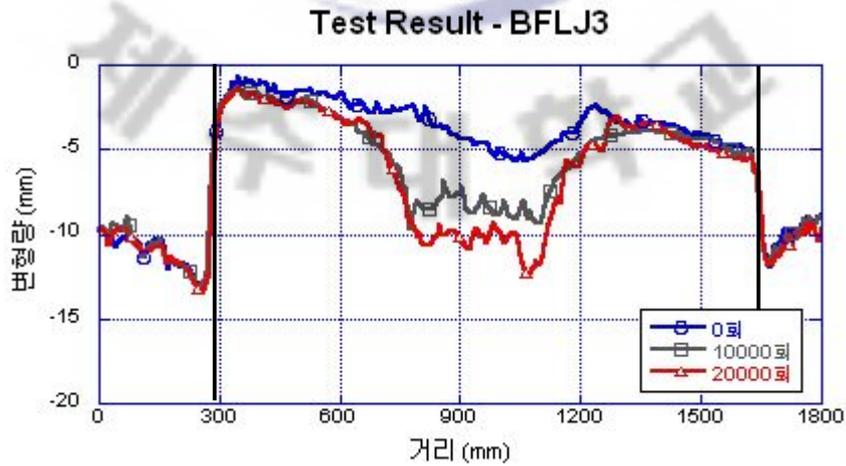


Fig. 5.27 Lateral test result of BFLJ3

## 6) BFLJ4 시험체

스터드 높이를 45mm로, 상부 포장 재료를 Techcrete, 겹 폭을 85mm로 하여 본 연구에서 적용한 모든 변수를 BFLJ4 시험체에 적용하여 실험하였다.

Fig. 5.28은 20,000회에서 시험체 상태를 나타낸 것으로 파괴되지 않았으나 같은 재료를 사용한 BFLJ2 시험체와 같이 조인트 표면에 바퀴에 의한 패임으로 표면이 손상되었다. 바퀴가 지나간 부분에서 10,000회 때 전체적으로 초기보다 약 1.55mm의 처짐이 나타났으며 이때의 최대 처짐은 1.95mm 발생하였다. 이후 20,000회 때 전체적으로 초기보다 2.6mm의 처짐이 발생하였으며 최대 처짐은 4.82mm 발생하였다. Fig. 5.29와 Fig. 5.30은 조인트의 종/횡 방향에서의 표면 변형을 나타낸 것이다.



Fig. 5.28 Real view of test (BFLJ4)

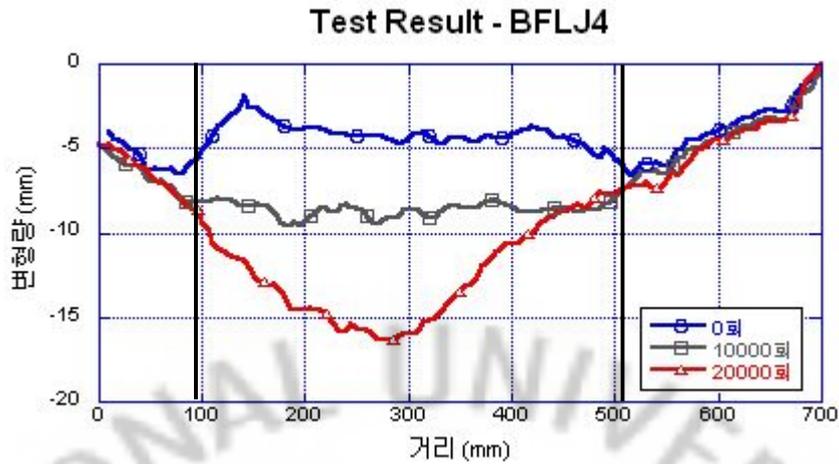


Fig. 5.29 Longitudinal test result of BFLJ4

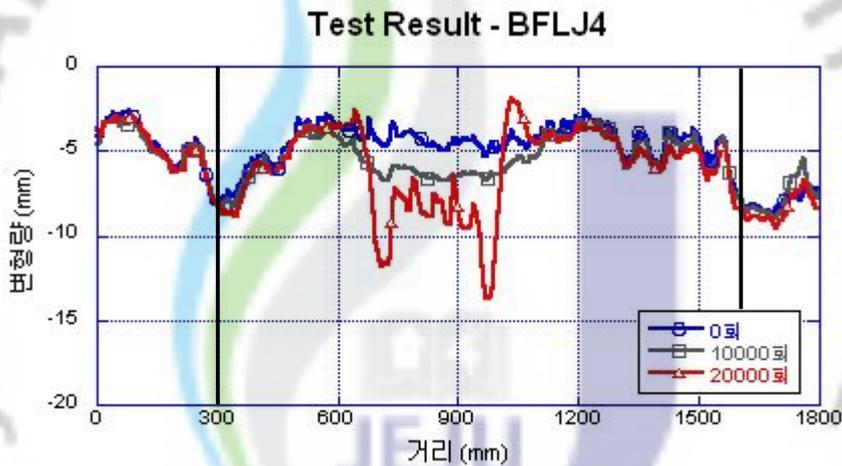


Fig. 5.30 Lateral test result of BFLJ4

### 7) 윤하중 실험 결과

개발된 매설형 신축이음장치의 경우 기존 매설형 시스템인 APJ 시스템에 비해 하부 시스템이 복잡하고 스테드가 있어 차량 하중에 대한 내구성이 우려되어 왔다. 이에 포장가속시험을 통해 하중에 대한 내구성을 판단하려 하였으며, 최종적으로 조인트 위에 카트가 100,000회 지나간 이후 조인트의 변형과 하부시스템의 손상 여부를 판단하려 하였다.

본 논문에서는 최종 결과를 확인하지 못하였으나, 현재까지의 변형을 고려했을

때 조인트 표면에서의 변형은 위의 실험 결과와 크게 달라지지 않을 것으로 판단하였다. 이는 상부 포장 혼합물이 초기에는 하중에 의해 변형이 크게 발생했지만 이후 실험이 진행될수록 변형량은 상당히 줄어드는 것을 알 수 있었기 때문이다. 또한 전체적인 처짐이 10mm 내외이며 파괴가 발생한 시험체의 하부 시스템을 살펴본 결과 손상이 없었던 점에서, 높이 60mm의 스테드에 미치는 영향은 적을 것으로 판단된다.

실제 도로에서 차량의 최대 축 중량은 10ton, 본 연구에서 사용된 카트(Cart)의 최대 축 중량은 18ton으로, 축 당 하중으로 보았을 때 거의 1.8배에 가까운 하중으로 실험하였다. 그 중에서도 카트의 앞 축은 타이어 2개로 타이어 하나에 실리는 중량은 9ton, 실제 차량의 축 당 타이어는 4개로 타이어 하나에 실리는 하중은 2.5ton이므로, 카트 세 대가 조인트 위를 지나면서 조인트가 받게 되는 최대 하중은 실제 차량의 하중보다 거의 3.6배까지도 받게 된다. 실험하면서 처짐에 의한 변형은 약간 발생했지만 무리 없이 카트가 지나가고 있고, 파괴가 발생한 시험체도 하중을 못 견뎌서가 아닌 binder의 과다 사용으로 인한 골재 탈락이라는 점을 고려한다면 개발된 매설형 신축이음장치의 하중에 대한 내구성은 충분하다고 판단된다.

## VI. 결 론

본 연구에서는 기존 매설형 신축이음장치의 단점을 개선하여 신축 성능을 향상시킨 새로운 매설형 신축이음장치 BFLJ system의 실제 차량 하중에 대한 내구성 평가를 위해 실험을 통해 거동을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 개발된 매설형 신축이음장치(BFLJs)는 기존 APJ system에 비해 신축성능이 우수하며 접합부에서의 응력 집중을 완화시켰다. 또한 차량 하중에 의한 하부 시스템의 손상이 없었던 점에서 기존 APJ system을 대신할 수 있을 것으로 판단된다.
2. BFLJ system에서 신축에 대한 온도 차이의 영향은 미비하여 전체적으로 고른 변형 분포를 나타내었다. 골재의 단일입도에 의한 상부 혼합물의 배합은 하부시스템의 강제적인 변위를 흡수하는 데 적합하며, 고탄성의 재료가 적합하다고 판단된다.
3. 개발된 매설형 신축이음장치(BFLJs)는 운하중 시험 결과 차량 하중에 대해 상부표면에서 최대 약 8mm 정도 처짐이 발생했다. 상부 혼합물의 단일입도 배합은 차량 하중에 대해 적당한 강성을 갖는 것으로 판단된다.
4. 매설형 신축이음장치의 표면에서의 binder 함량이 높을 경우, 차량이 지나감에 따라 binder와 골재가 탈락되는 현상을 유발할 수 있다. 따라서 매설형 신축이음장치 시공 시 맨 위층에는 binder의 함량을 적게 하고, 다짐 이후 모래와 같은 작은 마감 골재를 뿌려주어 골재 사이의 작은 틈을 메우는 것이 효과적이라고 판단된다.
5. 개발된 매설형 신축이음 장치에서 하부시스템은 차량 하중에 대해 안전한 것으로 판단된다.

6. BFLJ의 하부 Folding Lattice System의 양쪽 고정철판은 시공과 유지보수 면에서 어려움이 있어 이를 제거하여 와셔(washer)로 대처함으로써 현장 시공 및 유지보수 관리에 용이할 것으로 판단된다.
7. 개발된 매설형 신축이음장치(BFLJs)의 공용성을 판단하기 위해 지속적인 운하 중 시험을 통해 파손 여부/시기, 표면 변형 및 하부시스템의 손상 여부를 살펴 봐야 할 것으로 판단된다.



## VII. 참고문헌

- 한국도로공사, 도로설계요령-교량(2002)
- 국토해양부, 도로업무편람(2009)
- 건설교통부(2005), 가열 아스팔트 혼합물 배합설계 지침
- 한국건설교통기술평가원, “장수명·친환경 도로포장 재료 및 설계시공 개발 연구 보고서”, 건설기술혁신사업 연구보고서, 2008
- 도로교통기술원, “신축량이 적은 경우의 교량 신축이음부의 개선 방안 연구”, 연구보고서, 2005
- 홍성협, “매설형 신축이음장치의 개발 및 거동 분석”, 석사학위 논문, 2009
- 문경태, “Asphalt Plug Joint의 신축성능 평가를 위한 FEM 해석”, 석사학위 논문, 2009
- 박문식, “신축이음장치의 신축량 산정 및 연결부의 구조적 안정성에 관한 연구”, 석사학위 논문, 2002
- 정태준, “현장시험을 통한 개질아스팔트 혼합물의 공용성 평가”, 석사학위 논문, 2004
- Philip Park. (2007) "Development of Durable Asphalt Plug Joint", A Report for qualifying examination, University of Michigan
- Bramel, B. K., Dolan, C. W., Puckett, J. A., and Ksaibati, K. (1999). "Asphalt Plug Joints: Characterization and Specifications", Ph. D. Dissertation, University of Wyoming, Department of Civil and Architectural Engineering.
- Bramel, B. K., Puckett, J. A., Ksaibati, K., and Dolan, C. W. (1997). "Asphalt Plug Joint Usage and Perceptions in the United States." Transportation Research Record 1594, 172-178.
- Partl, M. N., Hean, S., and Poulikakos, L. (2002). "Asphaltic Plug Joint Characterization and Performance Evaluation." Proceedings of 9th International Conference on Asphalt Pavements, ISAP, Copenhagen.
- Reid, M. D., Imbabi, M. S., and Coutellier, D. (1998). "Effects of Joint Geometry on Response of Asphaltic Plug Joints." Journal of Transportation Engineering, 124(4), 311-318.

## 감사의 글

대학원에 들어온 후 어느덧 2년이란 시간이 흘러 논문을 마치게 되었습니다.

그 동안 좋은 일도 힘든 일도 있었지만 돌이켜 생각해보면 좋은 경험과 추억이 된 것 같습니다. 2년 동안 여러 고마운 사람을 만났고, 많은 도움을 받아 그분들께 진심으로 감사하다는 말을 전하고 싶습니다.

먼저 말썽꾸러기 아들을 믿고 보살펴주신 사랑하는 아버지, 어머니께 감사드리고, 앞으로 열심히 노력하는 아들 되겠습니다.

대학원 생활하면서 포기하지 않고 무사히 끝낼 수 있게 이끌어 주시고 지도해 주신 박상렬 교수님께 깊은 감사드립니다. 그리고 많은 가르침을 주신 양성기 교수님, 김남형 교수님, 남정만 교수님, 이병걸 교수님, 김상진 교수님, 이동욱 교수님께도 감사드립니다.

많은 조언과 질책을 해주신 연구실 창훈이형에게 진심으로 감사드리고, 졸업했 으면서도 많은 도움과 조언을 해준 철영이형, 성룡이형, 경남이형, 경태형, 성협 이형에게도 진심으로 감사드립니다. 그리고 힘들고 귀찮은 일을 시켜도 싫은 내색 않고 열심히 도와준 연구실 후배 석현이와 원석이에게도 고맙다는 말을 전합니다.

대학원 생활을 즐겁게 할 수 있게 옆에서 도와주고 응원해 준 동기들과 선배님께도 고맙다는 말을 전하고, 연구하면서 많은 도움을 주신 서창원 과장님께 감사드립니다.

마지막으로 논문을 마치면서 앞으로 더 나아가려 열심히 노력하는 사람이 되겠습니다. 많은 분들께 감사드리고 새해엔 좋은 일들만 가득하길 빕니다.

2010년 1월 좌 용 현 드림.