

W-Beam 및 Thrie-Beam 가아드레일 시스템의 거동 분석

Comparison of Structural Response of W-Beam and Thrie-Beam Guardrail System

고 만 기* 김 기 동** 우 광 성***
Ko, Man-Gi Kim, Kee-Dong Woo, Kwang-Sung

ABSTRACT

New Thrie-Beam guardrail section has been developed. The Characteristic of its geometry, energy absorbing capability and response to impact has been studied and compared with those of conventional W-Beam guardrail system. To compare the response to impact computer simulation using Barrier VII program was made. Stretch tests and static loading tests were conducted for the performance verifications.

1. 서론

도로 안전 시설물 중 대표적인 것으로 가아드레일 시스템을 들 수 있는데 이 것은 차선을 벗어난 차량을 노면의 위험물로부터 보호하고 완만하게 방향을 선회시켜 대형 후속 사고를 막기 위한 것으로 구조적인 강성과 탑승자의 안전을 위한 충격흡수 능력을 동시에 갖추어야 한다.

현재 국내에 사용 중인 대표적인 가아드레일 단면형태는 W형이다. W형 단면의 구조체원은 외국 시방서에 있는 단면을 국내 지침에 소개한 것으로 국내 교통 현황을 고려한 안전 구조물로서의 기능성에 대한 검증 없이 국내 현장에 사용되었다.

현재 유통되고 있는 W형 가아드레일은 SS40강을 폭 350mm, 코루게이션 75mm, 단면적 22.82cm²의 형상으로 굴곡시킨 것이나, 통행차량 Bumper 높이의 분포와 Overlay에 따른 포장면의 상승으로 가아드레일 단면 높이를 조정할 필요성이 대두되었다.

2. Thrie-Beam 단면의 제안

본 연구에서는 기존의 W형 단면보다 폭을 넓게 해서 다양한 차량에 대응할 수 있게 하고, 충격 에너지 흡수 능력이 우수하면서 경제성을 고려한 새로운 단면을 제안하고 그 성능을 기존 W-형 가아드레일 단면과 비교 검토하고자 하였다.

새로운 단면 선택의 주안점은 단면적(재료무게)을 기존의 W-Beam 단면에 비하여 증가시키지 않고 단면 폭을 최대로 하는데 두었다. 일정한 단면을 가지고 폭을 키우면 반대로 코루게이션이 작아져서 단면 2차모멘

* ** 공주대학교 토목공학과 조교수

*** 영남대학교 토목공학과 부교수

트가 작아지는데 차량과 가아드레일의 충돌시 거동이 단면 2차모멘트나 단면적에 크게 좌우되지 않는다는 것을 예비 분석 단계에서 확인하였기 때문에 단면폭을 크게 하는데 주안점을 두었고 단면폭을 최대한 확보한 상태에서 단면 2차 모멘트가 최대가 될 수 있게 하였다. 다음은 제안된 단면 형상을 나타낸다.

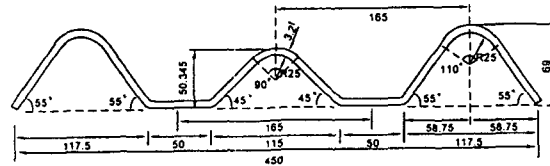


그림 1. Thrie-Beam 단면 제원

위와 같은 Thrie-Beam Type 가아드레일은 단면폭이 350mm에서 450mm로 늘어남에 따라 다양한 차량에 대응할 수 있고 포장보강시공(Overlay)에 따른 가아드레일 높이의 변화에 효과적으로 대응할 수 있으며 코 루게이션의 증가(단면 3회 굴곡)로 2회 굴곡된 W형 단면에 비하여 충격에너지 흡수능력의 증대를 기대할 수 있고, Post와 볼트를 2개 체결할 수 있으므로 기존의 W-Beam(볼트 1개 체결)에 비해서 충돌 후 가아드레일 시스템 전체적인 강성을 크게 유지할 수 있을 것으로 예상되었다.

위에 제시한 Thrie-Beam 특성들을 입증하기 위해서 다음과 같은 방법으로 연구를 진행하였다.

충돌에 대한 두 단면을 이용한 가아드레일 시스템의 퍼포먼스는 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 검증하되 충돌 기준은 국내지침을 기본으로 보다 현실적인 충돌조건에 대해 검토하였고 두 단면의 에너지 흡수 능력을 비교하기 위해서는 W-Beam 단면과 Thrie-Beam 단면의 Stretch Test를 실시하였다.

마지막으로 충돌 후 가아드레일과 Post가 동시에 외부 힘에 대응할 때의 시스템 강성을 정적재하시험으로 비교 검토하였다.

3. 컴퓨터 Simulation을 이용한 가아드레일의 성능 분석

3.1 방호구조물의 충돌 해석

차량과 방호구조물의 충돌에 관한 내용들을 명확하게 살펴보기 위해서는 충돌실험이 가장 효과적이거나 충돌실험 자체가 많은 시간과 경비가 소요되고, 여러 가지 다양한 충돌 조건을 부여할 수 없기 때문에 차량 방호구조물 충돌 시험을 대신하여 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램을 사용하는 것이 효과적일 수도 있다. 본 연구에서는 그 동안 안전 시설물의 설계에 많이 활용되어온 유한 요소 해석 프로그램 Barrier VII⁽¹⁾을 이용하여 기존의 W형 단면과 새로 개발된 Thrie-Beam 단면의 다양한 충돌조건에 대한 거동을 검토하였다.

Barrier VII 프로그램은 연성방호구조물에 대한 차량의 충돌해석에 사용된다. 이 프로그램은 방호구조물의 부재를 모델할 수 있는 다양한 요소들을 갖고 있는데, 이 요소들의 특성은 비교적 간단한 입력자료를 사용하여 부재의 복잡한 비선형거동을 정의할 수 있는데 있다. 차량은 비탄성 스프링으로 둘러싸인 임의의 형상을 갖는 강체로 2차원으로 모델된다. Barrier VII 프로그램은 방호구조물과 차량의 거동을 3차원으로 모델할 수는 없으나, 많은 충돌실험에 검증되어 연성방호구조물의 예비설계에 널리 사용되고 있다.

3.2 W-Beam과 Thrie-Beam의 검증

시뮬레이션을 통한 성능실험은 제안된 Thrie Beam이 4m간격의 원형 Post에 설치되어 있을 때 설치지침의 충돌조건에 어떻게 반응하는가를 Barrier VII 프로그램으로 분석 검토하였다.

아래 표는 시뮬레이션에 이용된 가아드레일 및 지주의 제원과 입력자료를 나타낸다.

표 1. 보와 지주의 제원

제원 종별	보				지주			보중심 높이(cm)	최대지주 간격(m)
	폭(mm)	코루게이션(mm)	두께(mm)	단면적(cm ²)	바깥지름(mm)	두께(mm)	매입깊이(cm)		
W-Beam	350	75	4.0	18.7	139.8	4.5	165	60	4.0
Thrie-Beam	450	69.50	3.2	19.5	139.8	4.5	165	60	4.0

표 2. 보의 물성치

종별	단면2차모멘트 I _{xx} (cm ⁴)	단면적 A(cm ²)	탄성계수 E(t/cm ²)	무게 W(kg/m)	항복축력 F _y (kg)	항복모멘트 (kg·cm)
W-Beam	96	18.80	2100	14.86	47000	75500
Thrie-Beam	87.13	19.53	2100	15.33	48825	94549

표 3. 지주 물성치

강성(Stiffness)	항복모멘트(Yield Moment)	극한전단력(Ultimate Shear)	파괴시 변위(Δ _f)
1200kg/cm	199430kg·cm	45400kg	30cm

충돌차량의 모델에 필요한 차량의 강성은 충돌실험에 의해서 결정되어야 하나, 설계차량에 대한 차량 충돌 실험결과는 현실적으로 구하기가 어려워, 현재 보고되어 있는 외국의 유사한 차량에 대한 실험결과⁽²⁾⁽³⁾를 사용할 수 밖에 없다. 다음은 3.5Ton 및 14Ton 차량의 입력자료를 사용한 외국의 차량 데이터이다.

표 4. 3.5톤 차량의 입력자료

무게 (Weight)	질량관성모멘트 (Mass moment of inertia)	강성(Stiffness)			
		Before Bottoming	After Bottoming	Unloading	Bottoming Distance
3500kg ^(**)	159468kg.cm.sec ²	2.8kg/cm ²	17.6kg/cm ²	528kg/cm ²	4.72cm
14000kg ^(***)	17653324kg.cm.sec ²	5.0kg/cm ²	17.6kg/cm ²	528kg/cm ²	4.72cm

* Parnell(2) ** 일본토목연구소(3)

3.3 설치기준에 따른 W-Beam 및 Thrie-Beam Type 가아드레일의 해석

시뮬레이션 Case는 “도로 안전시설 설치 및 관리지침”⁽⁴⁾을 근거로 3.5Ton 및 14Ton 차량이 충돌 속도 60 km/h, 충돌각도 15° 로 두 가아드레일 Type에 각각 충돌하는 경우로 하였다.

충돌차량이 받는 가속도는 탑승자의 안전에 있어서 중요한 지수이다. 현재 국내 지침은 충돌하는 동안 차량이 받게 되는 가속도를 측정하여 이를 일방적인 인내한계(4g)와 비교한다. 그러나 4g가 종방향인지 횡방향인지, 전 충돌과정 중의 최대치인지 혹은 몇 msec동안 평균치의 최대치인지 명확하지 않기 때문에 본 연구에서는 50msec평균의 최대치를 4g과 비교하고 미국의 기준 NCHRP350⁽⁵⁾을 참고로 탑승자충돌속도(OIV)와

Ridedown Acceleration을 구해서 정리하였다.

표 5는 설계지침의 종별에 해당하는 설계조건 즉, 3.5톤 및 14톤의 충돌차량, 충돌속도 60km/h, 충돌각도 15° 에 대한 시뮬레이션 결과를 정리한 것이다.

표 5. 해석결과(3.5Ton/14Ton)

항목	50msec 가속도(G)		탑승자 충돌 속도(m/s)		Ridedown Acc.(G)		가드레일 최대변위 (cm)
	종방향	횡방향	종방향	횡방향	종방향	횡방향	
W Beam	1.00/0.34	1.67/0.83	2.33/1.50	2.45/1.57	0.32/0.16	2.04/0.87	43.7/129.3
Thrie Beam	0.95/0.34	1.67/0.84	2.29/1.48	2.48/1.57	0.33/0.16	1.99/0.89	41.9/129.1
국내기준	-	4	-	-	-	-	110
NCHRP 350	-	-	12	12	20	20	-

위의 시뮬레이션 결과로부터 W-Beam 및 Thrie-Beam의 거동에 큰 차이를 발견할 수는 없다. 이는 시뮬레이션 프로그램의 한계로, Barrier VII이 단면의 형상차이를 인지할 수 없고 차량과 가드레일의 충돌후 거동이 프로그램 Input인 단면적, 단면 2차모멘트에는 비교적 Sensitive하지 않기 때문이다. 시뮬레이션 결과는 아래와 같이 정리할 수 있다.

1. 기준차량 3.5톤의 경우 지침의 충돌기준 (충돌속도 60km/h, 충돌각도 15°)에서 탑승자 안전도를 위한 50msec가속도는 종방향 1G, 횡방향 1.67G로 종횡방향 모두 4G에 훨씬 못미쳤고 가드레일 최대변위도 제한치 110cm를 훨씬 밑돌았다.(두단면 공통)
2. 14톤 차량의 경우 50msec가속도는 종방향 0.34G, 횡방향 0.84G로 모두 4G에 훨씬 못미쳤으나 가드레일 최대변위가 129.1-129.3cm로 제한치 110cm를 상회하였다.(두단면 공통)
3. 지침의 충돌속도에 따른 3.5톤, 14톤 차량의 시뮬레이션 결과 차량중량이 클수록 차량이 충돌시 받는 가속도는 적어지고 가드레일 처짐은 크게 증가함을 알 수 있다. 따라서 가드레일의 강성을 크게 증가시켜야 하는데 이는 소형차 탑승자의 안전도를 고려하면 상반되는 방향이다.(두단면 공통)

4. Stretch Test

Thrie-Beam 단면과 W-Beam 단면의 에너지 흡수능력을 비교하기 위하여 다음과 같이 Stretch Test를 실시 하였다. 실험은 W-Beam 단면 및 Thrie-Beam 단면으로부터 폭 5cm의 시편을 제작한 후 시편 양 끝에 철판을 부착하여 인장 시험기의 그림에 물린후 하중-변위를 측정하면서 원래 길이 까지 펼치는 것이다.

W-Beam은 t=4mm인 강판을 Rolling 한것이고 Thrie-Beam은 t=3.2mm 폭 610mm철판을 Rolling한 것이다. 결국 두께를 무시하고 Rolling에 의해서 Beam의 폭을 수축시킨 비율이 Thrie-Beam의 경우 0.26 [= (610-450)/610] 인 반면 W-Beam의 경우 0.23[(455-350)/455]으로 Thrie-Beam의 수축량이 크기 때문에 에너지 흡수능력도 클것으로 예측 되었다.

실험 결과, W-Beam의 최종변위량은 100mm로 최초의 철판폭 455mm로 거의 확장되었음을 나타냈다. 하중 200kg 변위 200mm까지는 탄성변형을 하다가 항복이 일어났는데 이점에서 편심으로 인한 부가적인 모멘트의 영향으로 굴곡점의 항복이 시작된 것이다. 이후 300kg의 하중에서 Stiffening이 진행되기 시작하였다.

Thrie-Beam의 최종변위량은 160mm로 최초의 철판폭 610mm로 환원되었음을 나타내었다. 하중 125kg, 변위 17mm까지는 탄성변형을 하다가 항복이 일어 났는데 W-Beam과 비교해서 항복이 빨리 시작된 것은 철판두께의 차이 때문으로 보인다. 이후 50kg의 하중재하에서 Stiffening이 시작되는데 그 속도가 W-Beam 단면에 비해서는 완만하였다.

두 단면의 에너지 흡수능력은 두 단면의 하중-변위 곡선 변위축 사이의 면적으로 비교할 수 있는데 그림 2는 이를 위하여 Thrie-Beam 단면의 하중-변위 곡선을 W-Beam의 하중-변위 곡선과 일치하게 좌측으로 이동시켜 에너지 흡수능력의 차이를 한눈으로 파악할 수 있게 한 것이다.

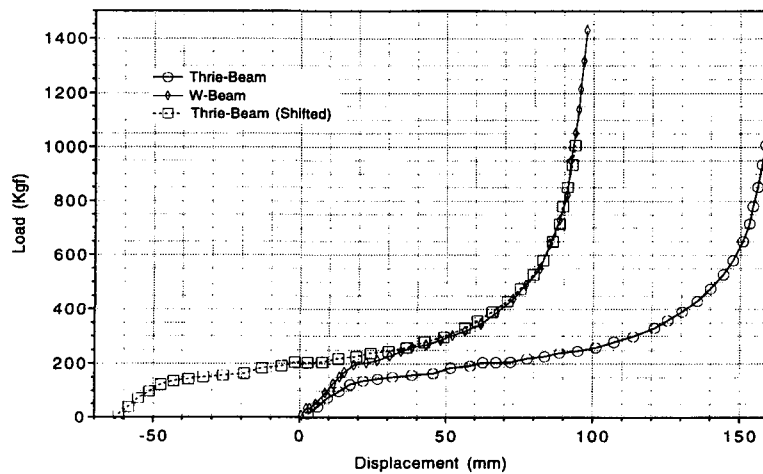


그림 2. 하중-변위곡선 (Thrie-Beam, W-Beam)

두 경우의 에너지 흡수능력은 Thrie-Beam의 경우 4425kg-cm이고 W-Beam의 경우 3850kg-cm로 Thrie-Beam 단면의 흡수능력이 W-Beam 단면의 흡수능력 보다 15%정도 우수한 것으로 나타났다.

5. 정적 실험

W-Beam, Thrie-Beam 단면을 이용한 가아드레일 시스템의 충돌에 대한 거동을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 검토하였다. 그러나 시뮬레이션에서는 복잡한 충돌상황을 2차원으로 묘사해야 하는 프로그램의 한계로 가아드레일 Beam 단면폭의 증대효과(Override, Underride, Snagging 방지)를 확인할 수 없고 W-Beam과 Thrie-Beam의 강성도 차이도 크게 나타나지 않았다. 본 연구에서는 다음과 같은 정적 실험을 통해서 가아드레일과 Post가 연결된 상태에서의 전체 시스템강성을 비교하여 보기로 하였다.

실험세트는 Post 지지용 앵커기초, 수평방향으로 하중을 전달하는 강봉, 강봉이 수평방향으로만 이동할 수 있게 해 주는 슬로티드 가이드 프레임, 수평방향의 재하용 케이블 방향을 수직으로 바꾸어주는 내력 지주로 구성되어 있고 재하는 15Ton 급 호이스트 크레인이 이용되었다. 본 실험장비는 도르래 원리를 이용하여 끌어올린 힘의 두배가 가아드레일에 작용하도록 되어 있다.

변위 계측을 위하여 Span 2의 중앙과 Post 3에 DP-2000C(TOKYO SOKKI)대변위 측정기를 각각 설치하였다. DP-2000C는 최대 변위 2m까지 계측할 수 있는 String Type Transducer이다. 내력포스트에 고정된 인장Cable에는 인장력 측정용 TLP10B(TOKYO SOKKI) LoadCell을 부착하여 도르래의 원리에 의하여 Beam 중앙에 작용하는 최대 20TON의 힘까지 측정할 수 있게 하였다.

그림 3은 완성된 실험장치의 배치도를 나타내고 있다.

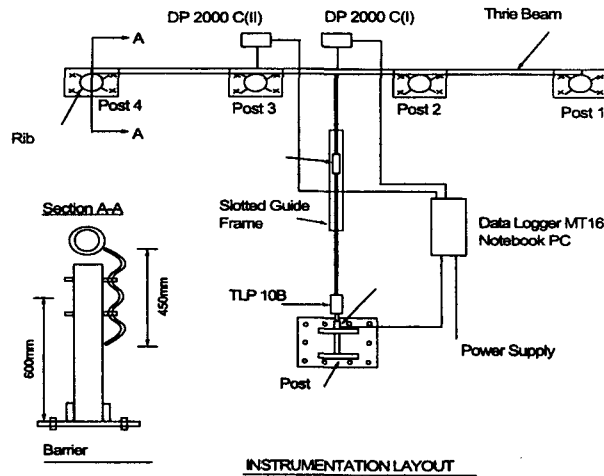


그림 3. Instrumentation layout

실험은 총 4회에 걸쳐 실시하였으며 실험 결과는 다음과 같다.

Test 1은 3 Span의 가아드레일(Span=4m)을 시공한 후 Crane을 이용하여 수평하중을 Beam의 중앙에 가하여 하중의 증가에 따른 변위를 측정하고 파괴시 하중과 파괴양상을 파악하고자 한 것이다.

지주는 콘크리트 기초 위에 앵커볼트를 시공한 후, 길이 777cm, 지름 D=140mm, 두께 t=4mm의 원형강주 밑에 집합용 plate(t=4mm)를 용접하고 4개의 Rib로 보강한 후 바닥앵커에 볼트 체결하였다.

이 가아드레일은 가아드레일 중앙의 최대 변위 85cm, 하중 약 12Ton에서 파괴가 일어났는데 Post의 좌굴 파괴가 원인이었고 이 때 Post 3의 최대 변위는 7.5cm이었다.

Test 2는 시중에 유통되고 있는 W-Beam을 3 Span으로(각 경간 길이=4m) 시공한 후 하중 증가에 따른 변위를 측정하고 파괴시 하중과 파괴양상을 파악하기 위하여 실시한 것이다. 지주는 Test 1의 경우와 동일하다. 이 가아드레일 시스템은 하중 7.5Ton, 가아드레일 중앙변위 70cm, Post 3의 변위 7.5cm에서 지주의 좌굴로 파괴되었다.

다음 그림은 Test 1과 Test 2의 계측 결과를 나타낸다.

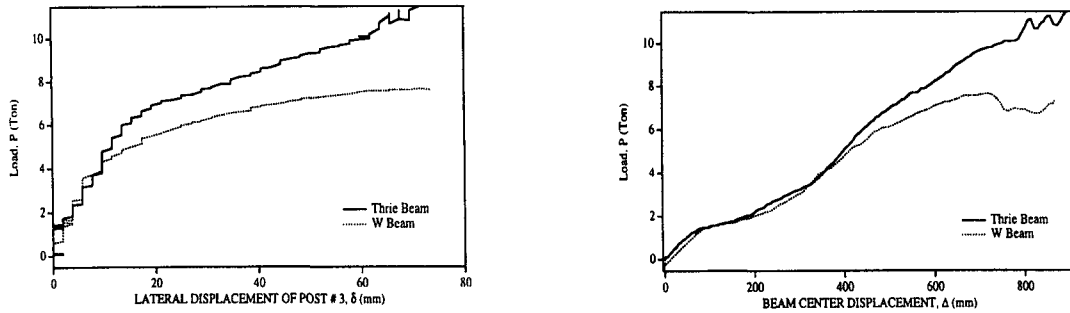


그림 4. Test 1과 2의 Post 3 및 Beam 중앙의 힘-변위 관계

Test 3은 Test 1과 동일하나 Post의 부착 판과 Post 사이의 Rib을 이용한 보강을 없애고 대신 지지판에 구멍을 내어 Post를 삽입한 후 위아래에서 용접한 것이다.

Beam단면은 제안된 Thrie-Beam이고 4m 간격으로 3경간을 실시공한 후 Crane으로 하중을 재하하여 하중에 따른 Beam의 처짐과 파괴양상을 관찰한 것이다. 이는 실험 1, 2에서 Beam의 인장파괴 대신 Post의 좌굴 파괴(Post와 Rib사이)에 의한 것이었으므로 Post 파괴를 가급적 제한하기 위해서 시도된 것이다.

변위 계측은 Test 1과 동일하게 수행하였고 Beam 중앙에 대한 하중-변위곡선과 Post 3의 하중-변위 곡선은 그림 5에 나타나 있다.

이 실험에서 Beam 중앙 최대 변위 약 750mm, Post 3의 횡방향 최대변위 180mm와 하중 8.5Ton에서 System이 파괴되었는데 Post 3의 용접부 바로 윗부분에서 지주의 크랙이 파괴의 주원인이었다.

Test 4는 Thrie Beam 거동과 W-Beam 거동을 비교할 목적으로 Test 3과 동일한 Post 조건에 W-Beam을 4m 간격으로 3경간 시공하여 하중대 처짐, 파괴양상을 고찰한 것이다.

계측 요령은 Test 3과 동일하다. 최종 파괴는 재하 하중 4.5Ton이하의 Span2의 Beam 중앙부 처짐이 약 60cm와 Post 3의 처짐 약 7.5cm에서 이루어졌다. 아래 그림은 Test 3과 Test 4의 Post 3과 Beam 중앙의 하중-변위 관계를 보인 것이다.

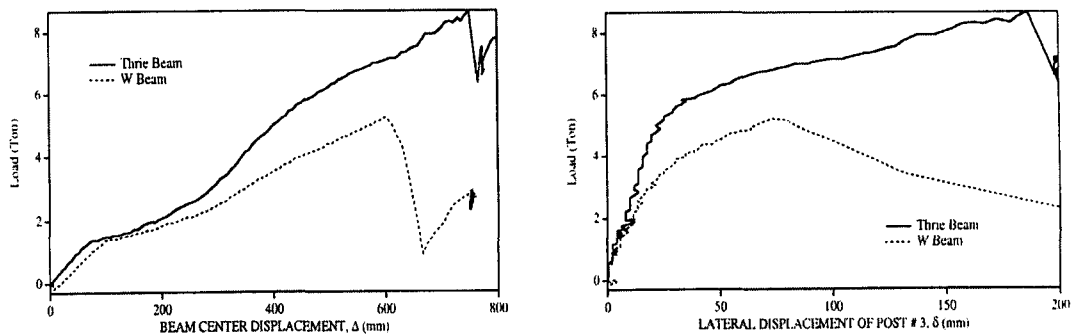


그림 5. Test 3과 Test 4의 Post 3 및 Beam 중앙의 하중-변위 곡선의 비교

정적실험의 결과로부터 Thrie Beam의 강성의 W-Beam의 강성보다 우수하고 파괴시까지의 에너지 소산 능력을 비교해 보면 Thrie Beam이 W-Beam에 비하여 아주 탁월함을 알 수 있다.

Thrie Beam의 에너지 소산 능력이 W-Beam에 비하여 탁월하게 나타난 주된 원인으로는 Thrie Beam의 경우에 지주와 보의 접속에 2개의 볼트를 사용하여 체결하므로 W-Beam(1Bolt 사용)에 비하여 타 경간으로의 힘 전달을 보다 원활하게 하고 연성 방호 구조물의 주된 파괴 원인의 하나인 지주와 보 분리 현상을 지연시키는데 있다고 사료된다.

6. 결론

본 연구를 통하여 Thrie-Beam 가아드레일은 기존 W-Beam가아드레일 단면에 비해 3.9%의 단면증가로 다양한 차량에 대응할 수 있고 충격에너지 흡수능력이 약 15% 증대되고, 충돌 후 시스템 전체적인 강성을 크게 유지할 수 있음을 입증하였다.

그러나 충돌시의 거동에 있어서는 시뮬레이션의 한계로 두 가아드레일 단면의 명백한 차이를 보이지 못했다. 충돌시의 거동 비교를 위한 실물 실험이 보장되어야 한다.

< 참고 문헌 >

- (1) Powell, G. H., "A Computer Program for Evaluation of Automobile Barrier System", Final Report, University of California, Berkely, CA, 1973
- (2) C. B. Parnell, "Development of a Bridge Railing End Treatment at Intersection Streets and Drives", Master's Thesis, Texas A&M University, Collage Station Texas, 1992
- (3) 건설성토목연구소, 도로부교통안전연구실, 일본도로공단, 강제방호책협회, "고규격 간선도로용 강제 방호책에 관한 연구", 1993
- (4) 건설교통부, 도로 안전 시설 설치 및 관리 지침-방호울타리 편, 1997
- (5) NCHRP Report 350, "Recommended Procedures for the Safety Performance Evaluation of Highway Features", 1993