

# 충돌해석을 통한 볼라드의 성능평가 및 설치기준 제안

## Performance Evaluation and Proposal on Standard Establishment of the Bollard Through Impact Analysis

차 은 호\*  
Cha, Eun-Ho

전 두 진\*\*  
Jeon, Doo-Jin

한 상 을\*\*\*  
Han, Sang-Eul

### Abstract

Recently damage of structures and loss of life by terrorism are internationally increasing. Among these terror that have a possibility to can happen in korea and that can caused lot of human life loss is the vehicle terror. To prevent the vehicle terror, the anti-ram barriers are needed. But domestic standard about anti-ram barriers are not clear. So, in this study, we will utilize and analyze the vehicle impact to evaluate the efficiency of the domestic bollard and suggest the installation standard of those. In Korea, granite, elastic, steel and stainless bollard are used. The performance of those bollard is not available. Elastic bollard couldn't stop the vehicle, and the others just could stop the vehicle only at the speed under 10kph. Therefore, set the variable to reinforce, and evaluate the defence efficiency of bollard. As a result, granite and elastic bollard was not suitable for the anti-ram barriers. Performance of steel bollard increased as thickness grew. So steel bollard should must be thicker than 10T. And the concrete compressive strength effected insignificantly on the defence efficiency, so more than 24MPa compressive concrete be used. Performance of stainless bollard increased as thickness grew. So stainless bollard should must be thicker than 13T.

*Keywords : Bollard, Vehicle impact analysis, Anti-ram barriers*

## 1. 서론

최근 국제적으로 테러에 의한 구조물 및 인명피해가 증가하고 있다. 특히 다중이용 시설인 대공간 구조물의 경우 테러와 같은 극한하중에 매우 취약하다. 이러한 테러에 사용되는 도구 또한 다양해지고 있다. 그 중 우리나라에서 발생할 확률이 높으며 많은 인명피해를 발생시킬 수 있는 테러 수단으로는 차량 테러가 있다. <Fig. 1>과 같은 차량테러로부터 대공간 구조물의 손상을 방지하기 위해선 차량진입방지방어물(Anti-ram barriers)이 필요하며, 미국의 FEMA에서는 Passive와 Active system으로 구별하

여 다양한 방어물을 제시하고 있다. 특히 Passive 방어물에는 벽, 화분, 펜스, 볼라드(Bollard) 등 여러 가지 방어물을 소개하고 있으며 그 중 흔히 사용되고 있는 방어물은 볼라드이다.



<Fig. 1> Vehicle used in terrorism

국외에서는 이러한 볼라드의 설치기준 및 성능기준이 명확하게 표기되고 있으며, 이 시스템의 개발사는 실제 차량을 이용한 충돌실험을 통해 성능을 확인하고 있다. 현재 국내에서도 차량진입 방지를

\* 정희원, 인하대학교 대학원, 석사과정  
Inha University, Structural mechanics

\*\* 정희원, 인하대학교 대학원, 박사과정  
Inha University, Structural mechanics

\*\*\* 교신저자, 인하대학교 건축공학과 교수, 공학박사  
School of Architecture, Inha University  
Tel: 032-860-7592, Fax: 032-750-5837  
E-mail: hsang@inha.ac.kr

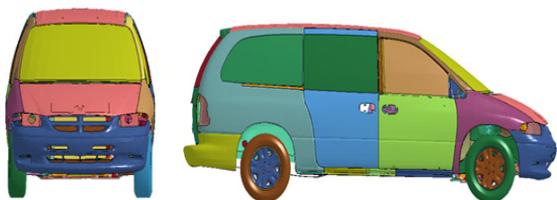
위한 방어물로 블라드를 많이 사용하고 있지만 국내 제품은 저속차량의 진입을 방지하는 목적으로 설치되고 있으며, 국외 설치기준에 비해 국내 설치기준은 명확하지 않고 보행자를 기준으로 되어있어 성능마저 의심되는 상황이다. 따라서 본 연구에서는 차량충돌해석을 통한 국내에서 사용되고 있는 블라드의 성능을 평가하고, 차량테러 방지를 위한 설치기준을 제안하고자 한다.

## 2. 충돌 해석 기법

블라드의 성능을 평가하기 위하여 충돌 해석을 수행하였다. 해석프로그램으로는 동적해석 및 충돌 해석에 사용되는 LS-dyna를 사용하였으며, 해석 모델은 다음과 같다.

### 2.1 충돌 해석 차량 모델

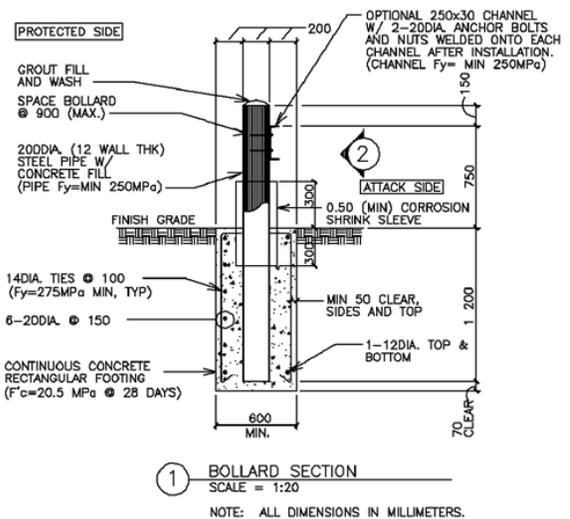
미국의 NHTSA에서는 실제 차량의 충돌 실험을 통해 얻어진 데이터를 활용하여 해석에 필요한 정확한 차량 모델을 구현했으며, 이를 공개하고 있다. 그 중 본 연구의 차량 충돌 해석에 사용할 모델은 CARAVAN이다. <Fig. 2>의 CARAVAN 모델은 무게가 2013kgf이며 엔진은 3.3L V6 타입, 타이어는 P215/65 R15 사이즈로 모델링 되어있다. CARAVAN의 실제 차량은 1996년식 Dodge Grand Caravan이며, 부품을 정밀하게 모델링되어 있다. 또한 실제 콘크리트 벽체에 정면 충돌 실험을 실시한 후 해석 결과와 비교 분석하였다.



<Fig. 2> Vehicle model of 1996 Dodge Grand Caravan

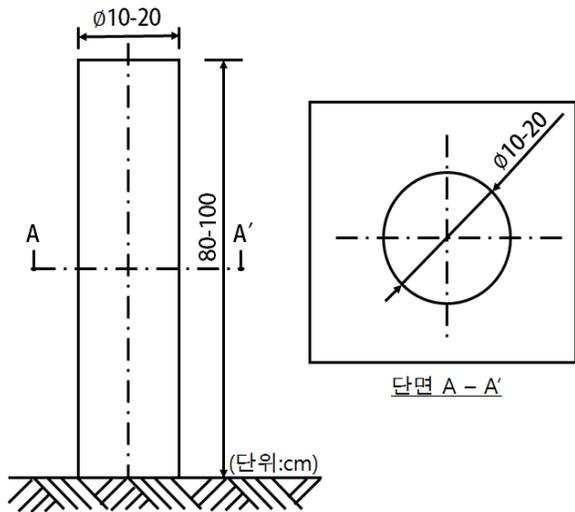
### 2.2 충돌 해석 블라드 모델

국내에서 사용되고 있는 블라드는 석재, 탄성체, 철재 및 스테인리스 블라드 등 4가지 정도이다. 철재 블라드는 속이 콘크리트로 차있는 반면 스테인리스 블라드는 속이 빈 강관 형태이므로 구분하여 설정되어 있다. 설치 방법에 따라 블라드는 앵커형, 매립형, 이동형이 있지만 본 연구에서는 많이 사용되는 매립형 블라드만 평가한다. 하지만 뚜렷한 기준이 없는 상태로 시공사의 임의대로 시공되고 있어 블라드의 정확한 제원을 얻기 어렵다. 따라서 시공업체에서 제공하는 규격 및 시공사례를 바탕으로 블라드 모델을 지반 밑으로 250mm 깊이로 설정하였으며, 정보가 부족한 부분은 <Fig. 3>과 같이 UFC-4-022-02에서 제공하고 있는 Passive 블라드 중 콘크리트로 속이 찬 강관 블라드의 최소조건을 참고하여 지반 보강은 24MPa 콘크리트를 사용하여 50mm 두께로 설정하였다.



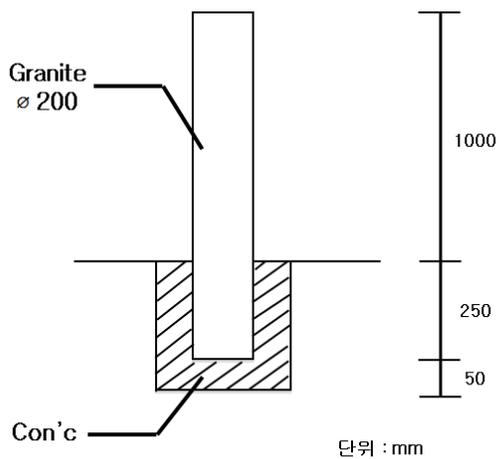
<Fig. 3> DOS passive anti-ram bollard (UFC-4-022-02)

또한 국내의 국토교통부령 제 120호 교통약자의 이동편의 증진법 시행규칙에서 권장하고 있는 <Fig. 4>의 블라드의 크기를 반영하여 직경 200mm, 지반으로부터 높이 1m의 블라드로 설정하였다.



〈Fig. 4〉 Subject of advice of the bollard

따라서 국내에서 사용되는 블라드의 모델은 〈Fig. 5~8〉과 같다.

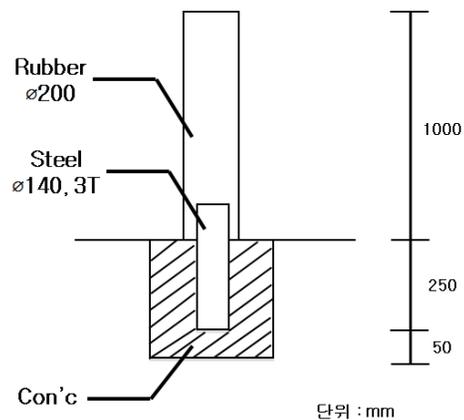


〈Fig. 5〉 Granite bollard

석재 블라드는 포천석이 주로 사용되며, 포천석의 경우 동탄성계수 52.59GPa, 동포아송비 0.153을 갖는다(김영화, 1997). 이러한 석재를 해석 프로그램 내에서 표현하기 위해 MAT\_BRITTLE\_DAMAGE를 사용하였으며(Erik Soderstrom, 2016), 포천석과 가장 비슷한 노르웨이의 Iddefjord 석재를 활용하였다(Y. Zhou & J. Zhao). 해석에 사용한 정확한 재료 특성은 <Table 1>과 같다.

〈Table 1〉 Material property of granite

Quantity	Granite	Unit
Mass density	2626	kg/m <sup>3</sup>
Young's modulus	54	GPa
Poisson's ratio	0.27	-
Tensile limit	7.1	MPa
Shear limit	40.4	MPa
Fracture toughness	200	J/m <sup>2</sup>
Shear retention factor	0.1	-
Viscosity	0.717	MPa
Compressive yield strength	163	MPa

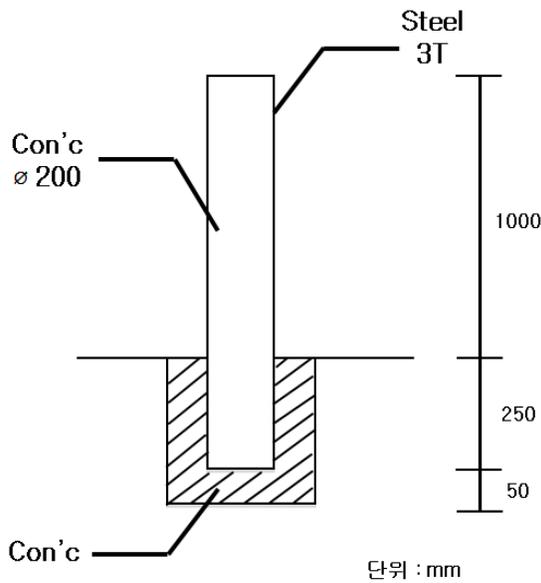


〈Fig. 6〉 Elastic bollard

탄성체 블라드는 EPDM 고무가 주로 사용되며 EPDM 고무의 경우 변형이 큰 동적거동을 해석 프로그램 내에서 표현하기 위해 MAT\_H-HYPERELASTIC\_RUBBER를 사용하였다. 해석에 사용된 정확한 재료특성은 <Table 2>와 같다(M. Shahzad, 2015).

〈Table 2〉 Material property of EPDM

Quantity	Granite	Unit
Mass density	1100	kg/m <sup>3</sup>
Poisson's ratio	0.499	-
Shear modulus	1.38	MPa
Shear strength	4.6	MPa
Tensile strength	12	MPa

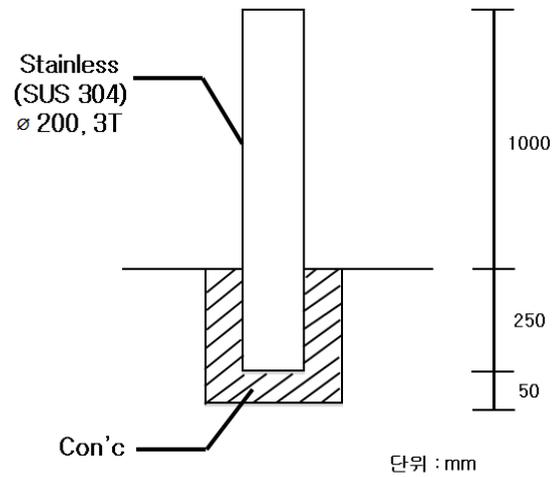


〈Fig. 7〉 Steel bollard

철제 볼라드는 강관의 부식을 방지하기 위해 페인트칠 또는 우레탄을 이용한 마감을 사용하지만 차량 충돌에는 영향이 없다고 가정하여 모델링에 포함하지 않았다. 콘크리트는 MAT\_CSCM\_CONCRETE를 이용하여 표현했다. 또한 강관은 MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC를 이용하여 표현했다 (S. K. Tay, 2012). 해석에 사용된 정확한 재료특성은 <Table 3>과 같다.

〈Table 3〉 Material property of concrete & steel pipe

Material	Mass density	Young's Modulus	Poisson's ratio	Strength
Concrete	2300kg/m <sup>3</sup>	-	-	Fck = 24MPa
Steel pipe	7800kg/m <sup>3</sup>	200GPa	0.3	Fy = 235MPa



〈Fig. 8〉 Stainless bollard

스테인리스 볼라드는 SUS304를 주로 사용하고 있다. SUS304의 특성을 프로그램 내에서 표현하기 위하여 MAT\_SIMPLIFIED\_JOHNSON\_COOK를 사용하였으며, 해석에 적용된 스테인리스의 재료특성은 <Table 4>와 같다(YE Liyan, 2012).

〈Table 4〉 Material property of SUS304

Quantity	Granite	Unit
Mass density	7930	kg/m <sup>3</sup>
Young's modulus	190	GPa
Poisson's ratio	0.3	-

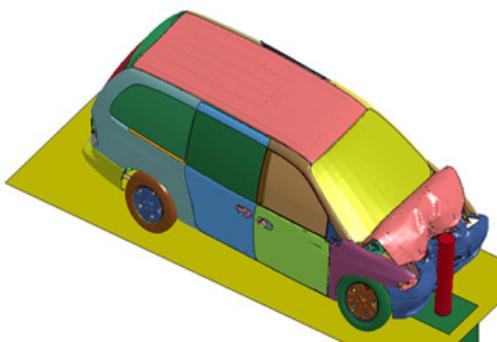
### 3. 볼라드의 성능평가

볼라드의 성능을 평가하기 위한 기준이 국내에서는 존재하지 않아 본 연구에서는 미국 ASTM F 2656-07의 기준을 따른다. ASTM F 2656-07에서는 충돌 차량에 따라 다양한 기호로 나타내고 있으며, 차량이 방어물과 충돌 후 정지하는데 필요한 거리를 P로 나타내고 있다. <Table 5>는 해석에 사용된 CARAVAN에 해당하는 ASTM의 기준을 정리한 표이다. 미국에서는 차량테러를 방지하기 위한 최소 성능으로 PU30 P1을 요구하고 있다.

<Table 5> Performance of anti-ram barriers (ASTM F 2656-07)

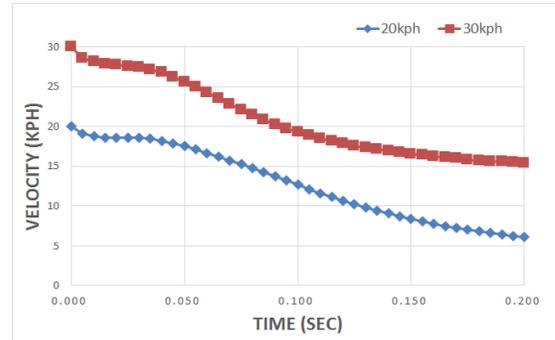
Typical test vehicle(weight)			Kinetic energy kgf-m(10 <sup>3</sup> )
Rating	Speed	Test range	
Pickup truck (P) (2300kgf)			
PU10	10mph	27.3kph and less	2.4
PU20	20mph	27.4 - 43.4kph	9.4
PU30	30mph	43.5 - 60.9kph	21.2
PU40	40mph	61 - 75.5kph	37.7
PU50	50mph	75.6 - 91.6kph	58.9
PU60	60mph	91.7kph - above	84.8
P standard (x = distance required to stop)			
P1	$x \leq 1m$		
P2	$1.01m \leq x \leq 7m$		
P3	$7.01m \leq x \leq 30m$		
P4	$x \geq 30m$		

블라드의 성능을 평가하기 위하여 20kph의 차량 속도부터 시작하여 10kph씩 속도를 증가시키며 해석을 반복하였다. 차량이 블라드에 충돌 후 1m 내에 정지하지 않을 때를 해석 종료시점으로 설정하였다. <Fig. 9>는 충돌해석 결과의 예이다. 충돌 후 차량의 속도가 10kph 이하로 감속되면 마찰력을 감안하여 차량이 1m 내에 정지하는 것으로 가정한다.



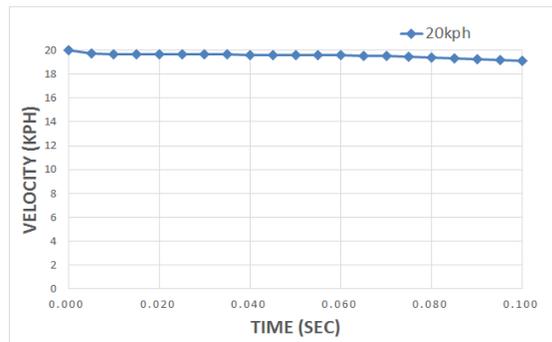
<Fig. 9> Example of impact analysis result

<Fig. 10~13>은 순서대로 석재, 탄성체, 철제 및 스테인리스 블라드의 충돌해석 결과 그래프이다.



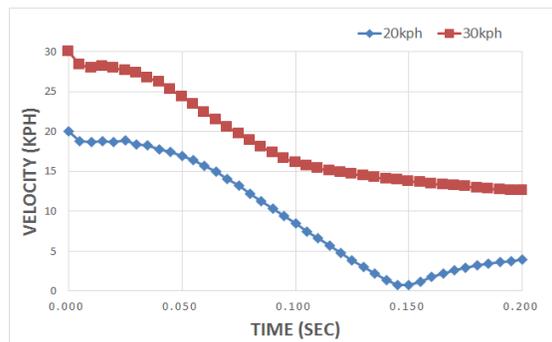
<Fig. 10> Vehicle speed change with time after granite bollard impact

석재 블라드는 20kph의 차량속도를 저지할 수 있으므로 PU10 P1의 방어성능을 보였다.



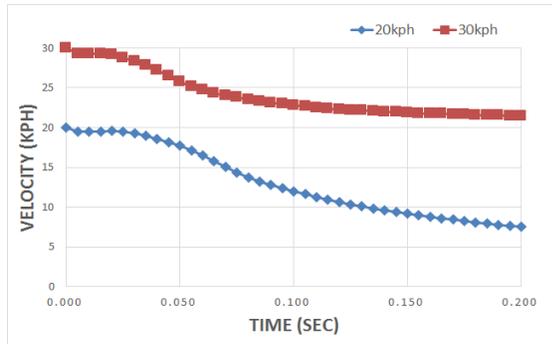
<Fig. 11> Vehicle speed change with time after elastic bollard impact

탄성체 블라드는 충분한 강성을 갖지 못하여 차량을 저지시키지 못하였다.



<Fig. 12> Vehicle speed change with time after steel bollard impact

철제 볼라드는 20kph의 차량속도를 저지할 수 있으므로 PU10 P1의 방어성능을 보였다. 20kph의 해석 결과에서 마지막 부분에 속도가 다시 증가하는 것은 차량이 충돌 후 뒤로 튕겨나가는 현상이다.



<Fig. 13> Vehicle speed change with time after stainless bollard impact

스테인리스 볼라드는 20kph의 차량속도를 저지할 수 있으므로 PU10 P1의 방어성능을 보였다.

해석 결과 석재 및 탄성체 볼라드는 차량테러방지를 위한 방어물로는 적합하지 않았다. 또한 철제 및 스테인리스 볼라드 역시 PU10 P1의 방어성능을 보여 차량테러방지를 위한 방어성능이 부족하다는 것을 볼 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 방어성능을 확보할 수 있는 설치기준을 제안한다.

#### 4. 볼라드의 설치기준 제안

설치기준을 제안하기 위해 위와 같은 방법으로 충돌해석을 반복수행하였으며, 철제 및 스테인리스 볼라드만 고려대상으로 한다. 또한 국내의 법령 및 시공 여건을 고려하여 직경과 높이, 지반 콘크리트 보강 두께는 동일하게 설정한다. 해석 결과를 바탕으로 다음의 식(UFC 4-022-02, 2010)을 활용하여 PU30 P1의 방어성능을 만족하는 기준을 제안한다.

$$KE(kgf \cdot m) = 0.0039 WV^2$$

KE = 운동에너지 (kgf-m)

W = 차량의 전체 무게 (kgf)

V = 차량의 스피드 (kph) 이다.

#### 4.1 철제 볼라드의 설치기준 제안

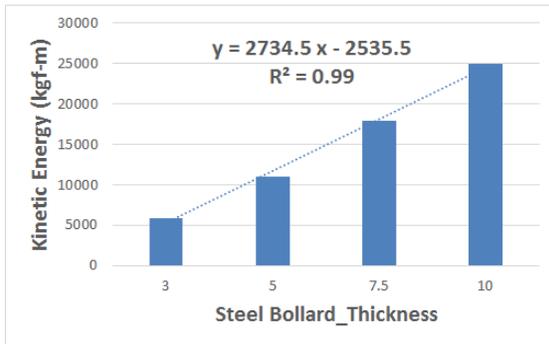
철제 볼라드의 보강방법은 강관의 두께 및 콘크리트 압축강도를 증가시키는 것이다. 강관 두께의 경우 기초안 3T와 비교하여 5T, 7.5T, 10T로 설정하여 해석을 수행하였다. 콘크리트의 경우 기초안 24MPa과 비교하여 27MPa, 30MPa로 설정하였다.

해석 결과는 <Table 6>과 같다. 충돌 전과 후의 속도는 차량이 볼라드와 충돌 후 1m 이내에 멈추지 않았을 때의 값이다.

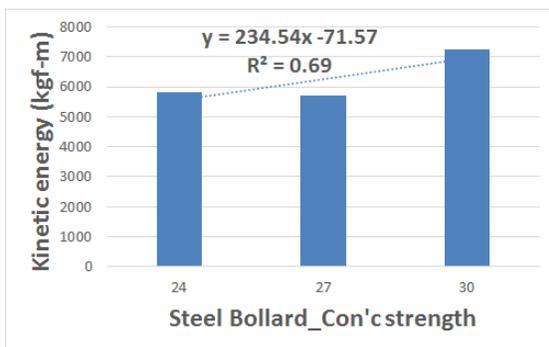
<Table 6> Impact analysis results of steel bollard

Variable		Velocity before impact (kph)	Velocity after impact (kph)
Steel pipe	3T	30	12.55
	5T	40	14.26
	7.5T	50	15
	10T	60	20.61
Concrete compressive strength	24MPa	30	12.55
	27MPa	30	13.11
	30MPa	40	26.04

<Fig. 14>, <Fig. 15>는 철제 볼라드의 변수에 따른 에너지 흡수량 그래프이다. 강관 두께가 증가함에 따라 에너지 흡수량도 증가하는 것을 볼 수 있다. 반면 콘크리트 압축강도는 증가하여도 에너지 흡수량에 큰 차이를 보이지 않았다. 차량진입방지를 위한 성능을 고려한 운동에너지 흡수량은 충돌 전 60kph의 차량이 충돌 후 10kph 이하의 속도로 줄어 들 때의 운동에너지 변화량이며 이는 27477kgf-m 이므로 따라서 철제 볼라드의 경우 강관 두께 11T, 콘크리트 압축강도 24MPa를 사용하여야 충분한 운동에너지 흡수량을 확보할 수 있다.



〈Fig. 14〉 Correlation between thickness of steel pipe and kinetic energy



〈Fig. 15〉 Correlation between concrete compressive strength and kinetic energy

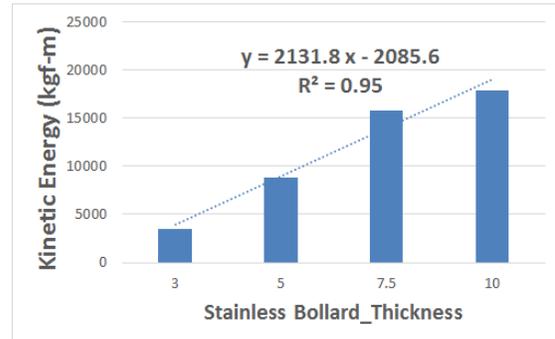
#### 4.2 스테인리스 블라드의 설치기준 제안

스테인리스 블라드의 보강방법은 강관의 두께를 증가시키는 것이다. 철제 블라드와 같이 강관 두께의 경우 기초안 3T와 비교하여 5T, 7.5T, 10T로 설정하여 해석을 수행하였다. 해석 결과는 <Table 7>과 같다.

〈Table 7〉 Impact analysis results of stainless bollard

Variable	Velocity before impact (kph)	Velocity after impact (kph)
Steel pipe	3T	12.55
	5T	14.26
	7.5T	15
	10T	20.61

〈Fig. 16〉은 스테인리스 블라드의 변수에 따른 에너지 흡수량 그래프이다. 강관 두께가 증가함에 따라 에너지 흡수량도 증가하는 것을 볼 수 있다. 따라서 스테인리스 블라드의 경우 강관 두께 14T를 사용하여야 충분한 운동에너지 흡수량을 확보할 수 있다.



〈Fig. 16〉 Correlation between thickness of stainless pipe and kinetic energy

### 5. 결론

본 연구에서는 차량충돌해석을 통하여 블라드의 성능을 알아보고 더 나아가 방어성능을 확보하기 위한 설치기준을 제안하였다. 결과는 다음과 같다.

1) 국내에서 사용되는 블라드는 석재, 탄성체, 철제 및 스테인리스 등 4가지이며 모두 차량테러방지를 위한 성능에 미달하였다.

2) 석재 및 탄성체 블라드는 차량테러방지를 위한 방어물에 적합하지 못하였다.

3) 철제 블라드의 강관 두께 보강 후 차량충돌해석을 수행한 결과를 바탕으로 운동에너지를 계산한 결과, 강관 두께가 증가함에 따라 운동에너지 흡수량도 증가하였다. 따라서 운동에너지 흡수량이 27544kgf-m인 강관 두께 11T 이상을 사용하였을 때 방어성능을 확보할 수 있다.

4) 철제 블라드의 콘크리트 압축강도 보강 후 차량충돌해석을 수행한 결과를 바탕으로 운동에너지를 계산한 결과, 콘크리트 압축강도가 증가하여도 운동에너지 흡수량의 변화는 미미했다. 따라서 콘크리트 압축강도는 기존안인 24MPa 이상을 사용해야 한다.

5) 스테인리스 볼라드의 보강 후 차량충돌해석을 수행한 결과를 바탕으로 운동에너지를 계산한 결과, 강관 두께가 증가함에 따라 운동에너지 흡수량도 증가하였다. 따라서 운동에너지 흡수량이 27760 kgf-m인 강관 두께 14T 이상을 사용하였을 때 방어 성능을 확보할 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업의 연구비지원(16AUDP-B100343-02)에 의해 수행되었습니다.

### References

1. The Federal Emergency Management Agency(FEMA), "FEMA 430 : site and urban design for security.", U.S.A., 2007
2. "National Highway Traffic Safety Administration(NHTSA).", www.nhtsa.gov
3. Unified Facilities Criteria(UFC), "UFC 4-022-02 : selection and application of vehicle barriers.", U.S.A., 2010
4. "교통약자의 이동편의 증진법 시행규칙 제 6 항.", 국토교통부령 제 120호, 2014년 8월 7일
5. Y. H. Kim, "Compressive Fatigue Loading Test and P-wave Velocity Change Characteristics in Granite Stone Samples", Korea Society of Engineering Geology, 1997, pp.17~18
6. Erik Soderstrom, "Characterisation and Modelling of Mechanical Properties for Granite and Diabase.", Master of Science in Engineering Technology Mechanical Engineering, 2016
7. Y. Zhou, J. Zhao, "Advances in Rock Dynamics and Applications.", CRC Press, 2011
8. Majid Shahzad, "Mechanical Characterization and FE Modelling of a Hyperelastic Material.", Institute of Space Technology, 2015
9. S. K. TAY, "Crash Impact Modelling Of Security Bollard.", 12th International LS-DYNA Users Conference, 2012, pp.1~10
10. YE Liyan, "Numerical simulation and experimental study of 304 metastable austenitic stainless steel in cup drawing", National Engineering Research Center of Die&Mold CAD, 2003
11. American Society for Testing and Materials (ASTM), "ASTM F 2656-07 : Standard Test Method for Vehicle Crash Testing of Perimeter Barriers.", U.S.A., ASTM international, 2007

- Received : November 03, 2016
- Revised : November 22, 2016
- Accepted : November 22, 2016