

45° 상향수제의 적정 간격 제시를 위한 흐름특성 실험 연구 An Experimental Study on Flow Characteristics for Optimal Spacing Suggestion of 45° Upward Groynes

김성중* / 강준구** / 여홍구***

Kim, Sung Joong / Kang, Joon Gu / Yeo, Hong Koo

Abstract

Groyne to control the direction and velocity of flow in rivers is generally installed for the purpose of protecting riverbanks or embankments from erosion caused by running water. In particular, as interest in river restoration and natural river improvement increases, groynes are proposed as a key hydraulic structure for local flow control and riparian habitat establishment. Groynes are installed mainly in groups rather than as individual structures. In case of groynes installed as a group, flow around the groynes change according to spacing in between the groynes. Therefore, groyne spacing is regarded as the most important factor in groyne design. This study aimed at examining changes of flows around and within the area of groynes that take place according to the spacing of groynes installed in order to propose the optimal spacing for upward groynes. To examine flow characteristics around groynes, this study looked at flows in main flow area and recirculation flow area separately. In main flow area, it examined the impact of flow velocity increasing as a result of conveyance reduction that is exerted on river bed stability in relation to changes in the maximum flow velocity according to installation spacing. As a factor causing impacts on scouring and sedimentation within the area of groynes, recirculation flow in the groyne area can lead problems concerning flow within the area and stability of embankment. As for recirculation area, an analysis was conducted on the scale of rotational flow and the flow around embankment that exerts impacts on stability of the embankment. In addition, a comparative analysis was carried with reference to changes of the central point of rotational flow that occur within the area of groynes. As a result of compositely examining the results, the appropriate installation spacing is proposed as min. four times-max. six times considering a decrease in flow velocity according to the installation of upward groynes, river bed stability and stability of embankments against counterflow within the area of groynes.

Keywords : Upward groyne, Groyne spacing, Main stream area, Recirculation area

요 지

수제는 일반적으로 하천에서의 흐름 방향과 유속을 제어하여 하안 또는 제방을 유수에 의한 침식작용으로부터 보호하기 위한 목적으로 설치될 뿐만 아니라 운하의 운영을 위한 충분한 수심 확보 목적으로도 이용된다. 특히 하천복원 및

* 교신저자, 한국건설기술연구원 하천해안연구실 수석연구원 (e-mail: jinx9482@kict.re.kr, Tel: 82-54-843-1802)

Corresponding Author, Korea Institute of Construction Technology, 283 Goyangdae-ro, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, Korea

** 한국건설기술연구원 하천해안연구실 연구위원 (e-mail: jgkang02@kict.re.kr)

Korea Institute of Construction Technology, 283 Goyangdae-ro, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, Korea

*** 한국건설기술연구원 하천해안연구실 연구위원 (e-mail: yeo917@kict.re.kr)

Korea Institute of Construction Technology, 283 Goyangdae-ro, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, Korea

자연하천 정비에 대한 관심이 커지면서 수제는 국부적인 흐름제어와 수중서식처 조성을 위한 주요 수공구조물로 제시되고 있다. 수제는 단일구조물로 설치되는 경우보다는 군수제의 형태로 설치되어 지는데 군수제의 경우 설치간격에 따라 수제역내 흐름이 다양하게 변화하기 때문에 수제간격은 군수제 설계에 있어서 가장 중요한 설계인자라 할 수 있다. 본 연구에서는 설치간격에 따라 다양하게 변화되는 수제 주변 및 수제역내 흐름에 대한 검토를 통해 상향수제를 대상으로 수제설치에 따른 적절한 간격을 제시하고자 하였다. 이를 위해 주흐름영역과 재순환영역으로 구분하여 수제 주변에서 발생하는 흐름을 대상으로 검토하였다. 주흐름영역은 통수능 저감으로 인해 증가된 유속이 하상안정성에 영향을 미치는 인자로 설치간격에 따른 최대유속의 변화에 대하여 검토하였다. 수제역내 재순환흐름은 수제역내 세굴 및 퇴적에 영향을 미치는 요소로서 수제역내 흐름 및 제방의 안정성에 문제를 야기시킬 수 있다. 재순환영역은 회전류의 규모와 제방부 안정성에 영향을 미치는 제방 주변에서의 흐름에 대하여 분석하였으며, 수제역내 발생하는 회전류의 중심점 위치변화에 대한 비교검토를 수행하였다. 결과를 종합적으로 검토한 결과 상향수제설치에 따른 유속저감, 하상안정성 확보, 수제역내 역류로 인한 제방안정성 확보 등을 고려하였을 때 적절한 설치간격은 최소 4배에서 최대 6배 이내로 설치할 것을 제안하고자 한다.

핵심용어 : 상향수제, 수제간격, 주흐름영역, 재순환영역

1. 서 론

수제는 하천에서의 흐름방향과 유속을 제어하여 하안 또는 제방을 유수에 의한 침식작용으로부터 보호하기 위해 호안 또는 하안에 설치하는 수공구조물이다. 수제는 오랜 과거부터 설치되어져 왔으며 현재는 그 효용성을 인정받아 현재까지 유지되고 있거나 다양한 목적의 수제가 설치되고 있다. 근래 들어서 하천에 대한 관점의 변화로 수제의 효용성이 높아지고 있는 현실에서 수제의 활용성에 대한 재검토가 이루어지고 있다. 수제는 자연하천을 모티브로 삼아 탄생된 인공적인 구조물이지만 자연을 훼손하지 않고 하천환경을 복원할 수 있는 최적의 수공구조물로 재조명 되고 있다.

단일수제의 사용은 급격한 사행발달을 촉진하고 수제 주변의 침식으로 인한 파괴의 위험성이 크기 때문에 운하 입구의 보호, 교량 주변의 흐름 유도 등의 특정한 경우에만 적용할 것을 권장하고 있다(HR Wallingford, 1997). 수제는 필요시 보호 목적으로 단일수제로 설치되기도 하지만 대부분의 수제는 국내외를 막론하고 여러 개의 수제가 군집을 이루는 군수제로 설치되고 있는 것이 현실이다. 여러개의 수제의 집합체로 이루어진 군수제는 수제와 수제 사이에 수제역을 조성하게 되는데 최근 들어 이러한 수제역에 대한 관심이 증대되면서 수중생물의 생태서식처 공간으로 각광받고 있다. 수제역은 하천 본류에서 유입된 흐름을 저감시키고 유사 퇴적을 발생시켜 흐름으로부터 하안을 보호하는 완충지의 역할을 담당한다. 이러한 수제역 공간에 대한 활용성 증대 및 경제성을 높이기 위

해서는 이를 동시에 만족시킬 수 있는 간격 설치기준이 마련되어야 하는데 이를 위해서는 수제의 간격변화로 인한 수제 주변 흐름특성을 우선적으로 파악하는 것이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 군수제 주변에서의 흐름특성 검토를 위한 고정상 실험을 수행하고, 이를 통해 하상안정성 및 제방보호 목적의 수제설치를 위한 상향수제의 적절한 설치간격을 제시하고자 한다.

2. 연구동향

수제간격에 대한 기존의 연구는 과거자료를 정리하고 인용하는 수준으로 수제 간격을 제시하고 있다. 수제간격에 대한 기존연구결과를 정리한 FHWA (1985) 보고서를 인용하면 Acheson (1968)은 곡선부에서의 곡률각도에 대해 수제의 간격을 $L/l' = 2 \sim 4$ 의 간격을 제시하고 있으나 수제간격과 곡선부 만곡도와의 관계에서 명확한 기준이 없다고 하였으며, Richardson and Simons (1974)는 설치조건에 따라 $L/l' = 1.5 \sim 2.0$ 과 $L/l' = 3 \sim 6$ 의 값을 제안하였는데 직선 또는 큰 반경을 가지는 곡선수로에서는 4~6, 작은 반경을 갖는 곡선수로에서는 3~4의 값을 제시한다고 하였다. 이러한 기존의 연구결과를 바탕으로 FHWA (1985)는 제방보호 목적에서 수제의 간격은 수제길이, 각도, 그리고 투과율, 뿐만 아니라 만곡수로의 곡률반경 등의 영향을 고려할 것을 제시하고 있는데 일반적으로 수제간격은 수제설치 목적에 따라 $L/l' = 1 \sim 6$ 의 범위를 제안하였다. Copeland (1983)는 하안 보호목적에 갖는 수제설치시 수제 주변의 하상변동으로 인한 영향검토를 통해

수제의 간격을 $L/l' = 3$ 이상으로서 제시하였다. HR Wallingford (1997)에서는 군수제 설치에 따른 고려사항으로 수제선단부에서 하류부 수제까지의 입사각과 주흐름영역에서의 유속, 수제선단부 유속 그리고 제방유속에 대하여 검토하였으며, 군수제의 설치간격에 대한 경제성을 중요시하여 6배 이하의 수제간격을 제시하였다. 군수제 실험과 관련된 국내의 연구로는 Kang et al. (2006)이 연직수제를 대상으로 1~12배의 수제간격에 대한 실험을 수행하여 수제 주변에서 발생하는 흐름에 대해 최대유속 및 제방부 유속분포에 대해 검토하여 하안보호 목적의 적절한 수제간격은 4배 미만으로 설치할 것을 제안하였다. 그러나 이러한 연구들은 주로 연직(흐름에 직각)수제를 대상으로 제시된 간격으로써 설치각도를 고려한 연구는 수행되지 못하였다. 수제의 설치각도에 대한 연구로 FHWA (1985)에서는 상향수제의 경우 흐름의 역제로 인해 수제하류부에서는 퇴적이 쉽게 발생하므로 제방과 수제의 상류면을 보호할 필요가 적어진다고 언급하였으며, Ahmad (1953)의 연구결과를 인용하여 수제의 설치 각도는 정해진 원칙 없이 주로 개인적인 경험과 설계자의 판단에 의지한다고 정성적인 의견을 제시하기도 하였다.

3. 상향군수제 흐름특성실험

3.1 실험방법 및 조건

군수제 흐름특성 검토를 위한 실험수로는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 $2.0m(B) \times 0.65m(H) \times 40.0m(L)$ 의 직선수로에서 수행하였으며, 실험시설은 $0.012 \sim 0.4m^3/s$ 를 공급할 수 있는 폭 1.2m 위어를 유량공급 장치를 이용하였다. 수제간격에 따른 흐름변화를 파악하기 위해

두 개의 동일한 수제를 제작하여 설치하였다. 설치된 수제는 아크릴로 제작되었으며 수로폭(B)대 수제길이(l')의 비는 0.15로서 상향($\theta = 45^\circ$)수제에서의 수제길이는 수로폭방향을 기준으로 제방과 연직된 수제의 길이로 정의 하였다. 본 실험에서는 수제역 및 수로 본류의 유속장 측정을 위해 LSPIV 기법을 적용하였는데 LSPIV 기법은 실험실에서 영상해석기술을 이용하여 미소 영역의 유속을 측정하기 위해 개발된 입자영상유속계(PIV, Particle Image Velocimetry)를 비교적 규모가 큰 영역에 적용함으로써 표면유속을 측정하기 위한 영상측정기법의 하나이다. LSPIV는 LDV (Laser Doppler Velocimetry)와 ADV같은 측정기기가 갖는 한계를 극복하여 대상 영역 전체의 순간 유속장을 획득할 수 있다는 장점이 있기 때문에 최근 수제와 같은 구조물 주변의 국부적인 흐름장을 측정하는데 많이 이용된다(Ettema and Muste, 2004). Fig. 2(a)는 LSPIV 기법을 이용한 계측상황을 나타낸 그림이며, Fig. 2(b)는 촬영된 이미지를 대상으로 후처리 과정을 통해 추출한 이미지를 나타낸다. 이러한 그림은 입자의 이동상황을 명확하게 보여줌으로써 수제주변에서 발생하는 유선의 형태를 명확하게 관찰하는데 유용한 자료로 이용된다. 실험조건은 Table 1과 같이 3가지 유속조건과 7가지 수제의 간격조건에 대한 실험을 수행하였다.

3.2 흐름특성인자

일반적으로 수제가 설치된 수로에서 흐름은 상류단에서 유하되는 흐름이 수제를 만나면서 수제선단부로부터 흐름분리가 발생하게 되며 수제후면부에서는 재순환흐름이 발생하게 된다. Fig. 3은 군수제 주변흐름특성 검토를 위한 변수를 정의한 그림으로써 수리특성실험은 수제주

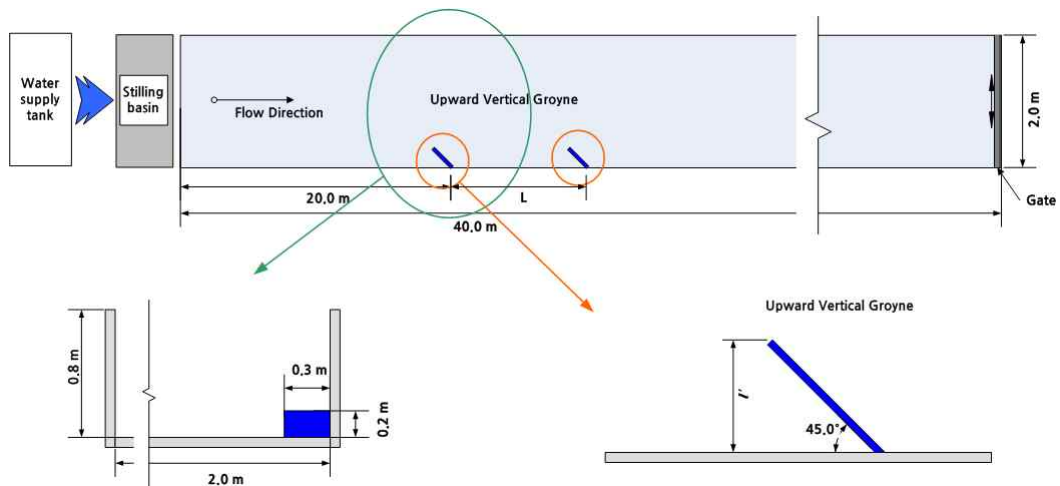


Fig. 1. Experimental Channel and Groynes (plan view & section view)

변에서 발생하는 주요흐름을 대상으로 검토하였다. 수제 설치로 인해 변화하는 주변 흐름은 주흐름, 수제역내 재순환흐름, 하안선(제방)을 따라 흐르는 역류흐름으로 대표된다. 주흐름영역은 수제설치로 인해 하도축소로 의한 흐름이 집중되어 변화되는 구간으로서 주변흐름에 비해 고유속이 발생하는 구간으로 본 연구에서는 하도내 하상 안정성에 영향을 미치는 최대유속(U_{ch_max})을 대상으로 설치간격에 따른 영향을 검토하였다. 재순환영역에서는 회전류 발생으로 인한 다양한 흐름이 발생하는 구간으로 재순환흐름의 규모를 검토하기 위해 재순환영역의 길이(S_L)와 폭(S_h)에 대하여 분석하였다. 제방부 흐름은 회전류 발생으로 하안선을 따라 발생하는 역류흐름이 발생하는 구간으로 제방부 안정성 영향을 검토하기 위해 제방주

변 최대유속(U_{le_max})에 대하여 분석하였다. Fig. 4는 LSPIV 기법을 이용하여 수제주변 흐름패턴 및 유속분포도를 나타낸 것으로 2개 이상의 수제설치로 인한 수제주변에서의 변화되는 흐름특성을 확인할 수 있다. Table 2는 LSPIV 기법을 이용하여 측정된 자료를 이용하여 실험조건별로 자료를 정리한 것이다.

4. 실험결과 분석

4.1 주흐름 영역에서의 흐름특성

수제와 같은 돌출 구조물은 제방부와 호안 부근의 유속을 감소시키거나 흐름방향과는 반대의 역류를 발생시켜 흐름을 지연시키는 효과가 있는 반면 수로의 통수능을 감

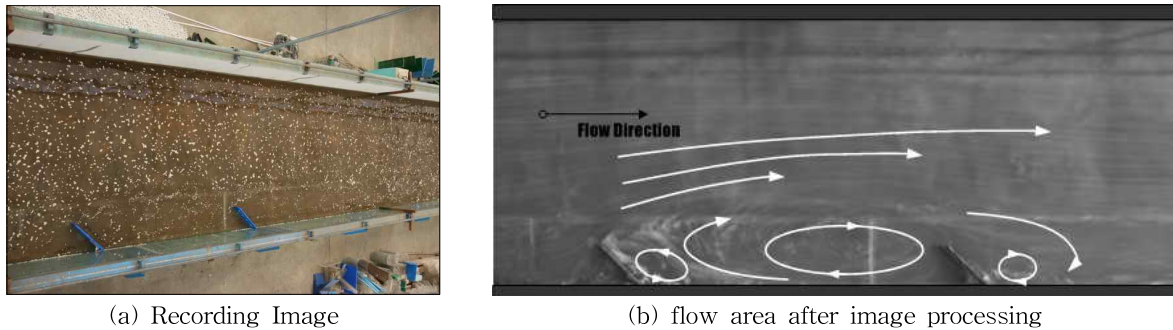


Fig. 2. Flow Fields using LSPIV ($\theta=45^\circ$, $L/l'=8$)

Table 1. Experimental Conditions

Groyne Type	Length of Groyne l'/B	Installed Angle $\theta(^{\circ})$	Spacing L/l'	Depth $d(m)$	Velocity $U_{app}(m/s)$	Fr
Vertical	0.15	45	2 ~ 8	0.15	0.25	0.21
					0.30	0.25
					0.40	0.33

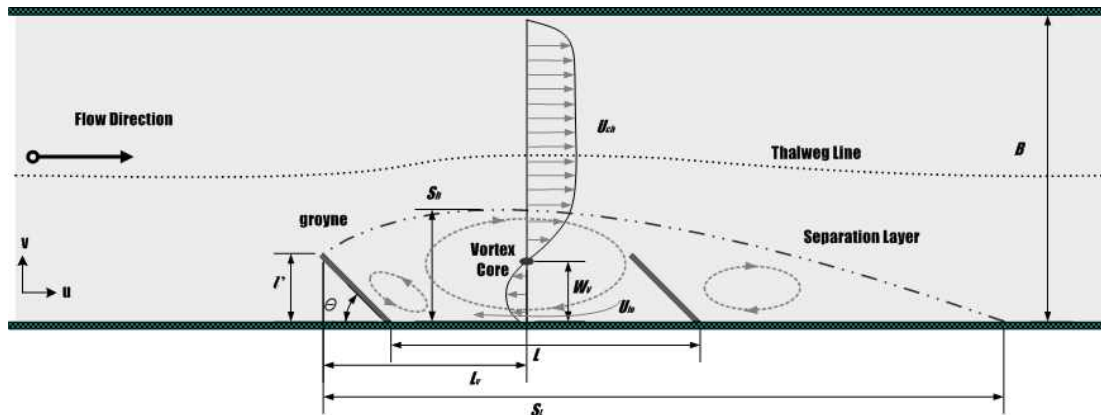


Fig. 3. Definitions of Flow Variations Around the Upward Groynes

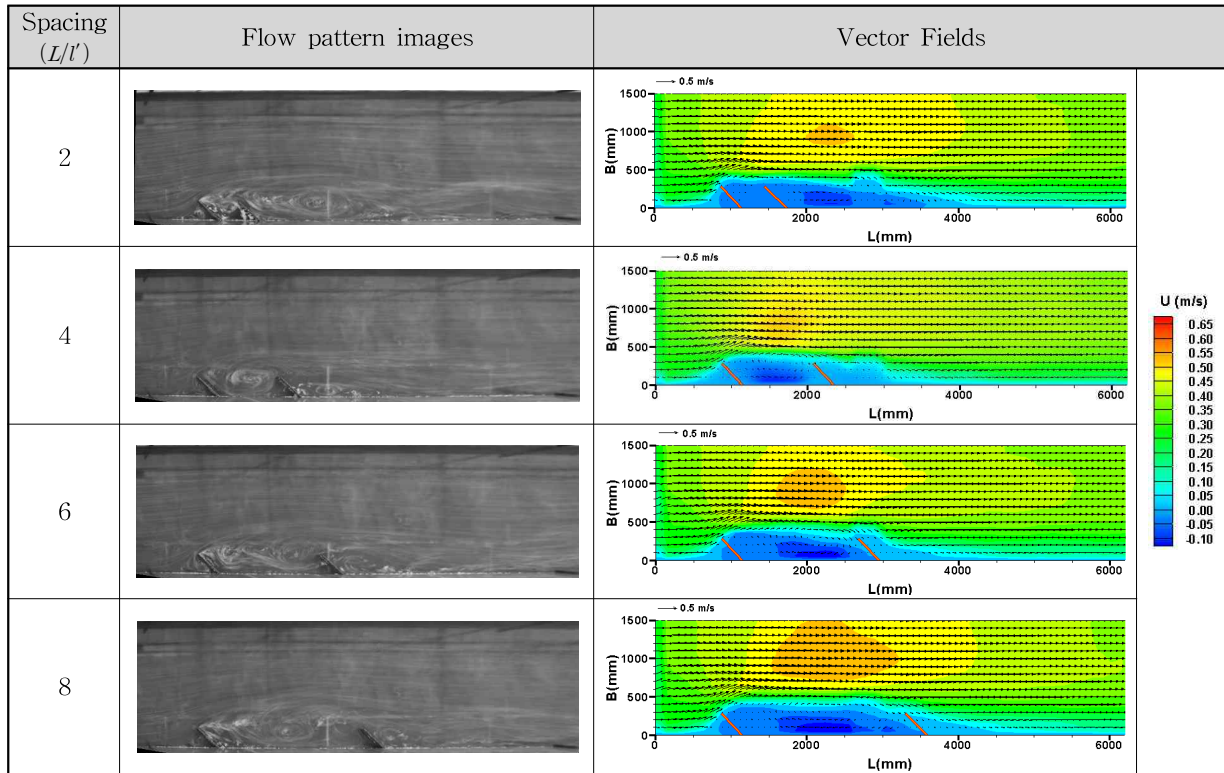


Fig. 4. Variation of Flow Pattern with Groyne Spacing

Table. 2 Experimental Results

Case	L/l'	Fr	$\theta (^{\circ})$	U_{ch_max}/U_{app}	L_{ch_max}/l'	S_L/l'	S_h/B	$ U_{te_max} /U_{app}$	L_{te_max}/l'	L_c/l'
UVG15V25_2	2	0.21	45	1.64	5.40	10.70	-	0.05	2.73	-
UVG15V25_3	3	0.21	45	1.60	2.40	10.55	0.21	0.06	1.22	1.92
UVG15V25_4	4	0.21	45	1.66	2.40	9.06	0.22	0.33	2.53	2.57
UVG15V25_5	5	0.21	45	1.67	3.00	9.23	0.22	0.35	3.46	3.09
UVG15V25_6	6	0.21	45	1.65	4.00	10.23	0.23	0.42	4.56	4.42
UVG15V25_7	7	0.21	45	1.67	4.00	10.25	0.22	0.47	4.56	3.71
UVG15V25_8	8	0.21	45	1.68	4.30	11.31	0.23	0.56	4.56	4.67
UVG15V30_2	2	0.25	45	1.69	4.80	11.12	-	0.02	2.73	-
UVG15V30_3	3	0.25	45	1.65	3.00	9.88	0.20	0.10	1.78	1.71
UVG15V30_4	4	0.25	45	1.72	2.70	8.12	0.22	0.36	2.34	2.62
UVG15V30_5	5	0.25	45	1.71	3.00	8.88	0.21	0.31	3.74	3.30
UVG15V30_6	6	0.25	45	1.74	4.00	8.85	0.23	0.56	4.56	4.16
UVG15V30_7	7	0.25	45	1.77	4.60	9.73	0.23	0.58	4.56	4.17
UVG15V30_8	8	0.25	45	1.78	4.80	10.80	0.23	0.59	4.65	4.75
UVG15V40_2	2	0.33	45	1.59	4.60	10.59	0.19	0.03	2.73	1.44
UVG15V40_3	3	0.33	45	1.57	2.40	8.99	0.21	0.09	1.78	2.06
UVG15V40_4	4	0.33	45	1.63	2.70	8.80	0.21	0.21	2.34	2.69
UVG15V40_5	5	0.33	45	1.66	3.00	9.47	0.22	0.40	3.65	3.29
UVG15V40_6	6	0.33	45	1.67	3.20	9.02	0.21	0.38	4.56	4.19
UVG15V40_7	7	0.33	45	1.68	4.00	10.03	0.23	0.49	4.65	4.44
UVG15V40_8	8	0.33	45	1.63	4.00	10.87	0.22	0.51	4.56	4.09

소시켜 분류 흐름의 유속을 증가시킨다. 이러한 분류 유속의 증가는 하상안정성에 영향을 미치는 인자로서 군수제의 경우에는 수제의 간격을 결정하는데 있어서 고려해야 할 중요한 요소 중의 하나이다. 설치간격에 대한 주흐름영역에서의 주요 흐름특성인자는 최대유속의 크기와 발생위치로서 이들 두 요소는 하상변동에 영향을 주는 요소로써 적정수제간격을 제시하기 위한 검토 자료이다. 분류영역에서의 유속변화검토는 주흐름영역에서의 최대유속비 변화를 검토하여 Fig. 5에 나타내었다. 최대유속비는 수제간격에 따른 폭방향 최대유속값($U_{ch,max}$)을 검출하여 유입부유속(U_{app})으로 무차원화 하였다. 수제의 설치간격에 따른 최대유속비는 유입부 유속의 1.57~1.78배의 범위로 관측되었으며, 설치간격 3배 이하일 경우 감소하다가 4배 이상으로 이격될수록 점차 증가하는 경향을 나타내고 있었다. Fr 에 따른 영향검토 결과 전반적인 경향은 동일하게 나타났으나 큰 변화점을 찾기는 어려웠다.

주흐름의 최대유속은 크기도 중요하지만 최대유속이 발생위치 검토를 통해 예측하는 것도 흐름특성을 파악하는데 있어 중요한 요소이다. 최대유속 발생위치 지점은 다양한 하상변동을 발생시키며 군수제와 같이 여러 개의 수제를 설치할 경우 복합적인 문제점을 야기 시킬 수 있기 때문에 발생위치에 대한 영향을 검토할 필요가 있다. Fig. 6은 최대유속 발생위치에 대한 간격변화에 따른 거리비를 표현한 그림으로서 최대유속발생위치($L_{ch,max}$)는 수제길이(l')로 나누어 간격변화에 따른 상관성을 검토하였다. 실험결과 설치간격이 3배 이상일 경우 최대유속의 발생위치는 주로 첫 번째 수제로부터 수제길이의 2.4~4.8배 지점에서 최대유속이 발생하고 있는 것으로 나타났으

며, 수제의 간격이 넓어질수록 최대유속의 발생위치는 서서히 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 수제길이가 2배 이하일 경우 수제의 간격이 충분하지 못하여 단일수제와 동일한 흐름특성을 나타내고 있는 것으로 확인되었다. 이는 단일수제 설치시 최대유속의 발생위치가 수제길이의 5~6배 사이에서 발생한다는 Kang et al. (2006)에 의한 연구결과로 확인할 수 있다. 따라서 협소한 설치간격은 수제의 효율성 측면에서 가급적 피해야 할 것으로 판단된다. KICT (2011)에서는 상향수제에 대한 간격별 하상변동 실험을 통해 수제의 간격이 3배 이하일 경우 세굴심의 영향범위가 후면부 수제까지 영향을 끼치고 있다는 것을 실험을 통해 검증하였다. 따라서 수제간격이 3배일 경우 최대유속발생위치는 수제길이의 2.3~3.0배 간격 지점에서 발생하므로 하상이 단단한 암반 또는 세굴방지공이 설치되어 있지 않다면 수제간격은 3배를 초과하여 설치하여야 할 것이다. 이는 최대유속의 발생위치 및 전면부 수제 및 후면부 수제구조물에서의 국부세굴과 같은 하상변동 발생으로 구조물의 안정성 확보측면에서 위협적일 수 있기 때문이다. 따라서 수제의 최소 설치간격은 4배 이상 확보할 필요가 있을 것으로 판단된다.

4.2 재순환영역에서의 흐름특성

적절한 수제간격 제시를 위해서는 간격에 따른 재순환 영역에서의 흐름을 검토할 필요가 있는데 검토요소는 재순환흐름의 규모이다. 기존연구(Kang et al., 2005)에 의하면 단일 수제 설치시 수제 후면부에서는 재순환흐름이 발생하는데 그 크기는 수제길이의 10~12배로 발생하고 있으며, 이러한 재순환흐름은 1차적으로 수제선단부에서

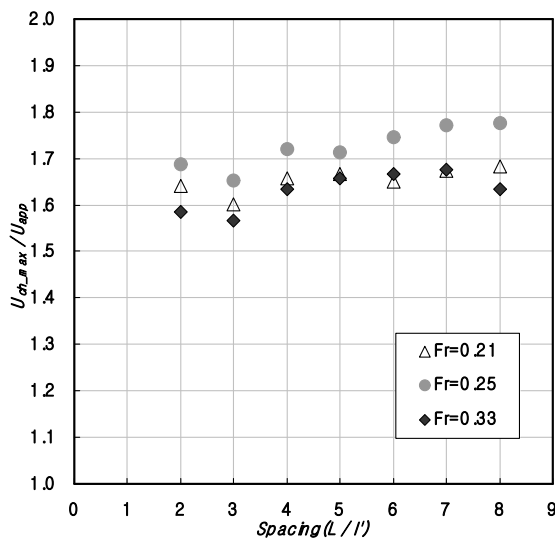


Fig. 5. Relationship of $U_{ch,max}$ and Groyne Spacing

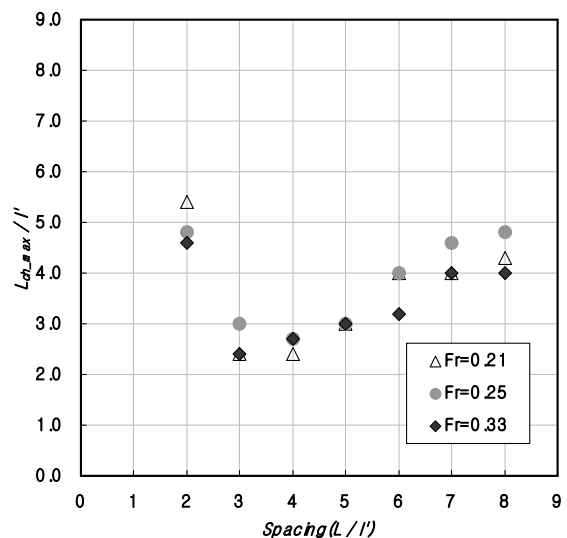


Fig. 6. Relationship of $L_{ch,max}$ and Groyne Spacing

발생하는 세굴과 더불어 수제역내 세굴 및 퇴적에 영향을 미치는 요소로서 수제역내 흐름 및 제방의 안정성에 문제를 야기시킬 수 있다고 하였다. FHWA (1985)에서는 수제의 설치각에 관계없이 수제끝단부를 위치를 기준으로 설치각에 관계없이 재순환영역의 길이는 동일하게 발생하고 있다고 하였다. 그러나 군수제 설치에 따른 재순환 흐름은 후면부 수제로 인한 흐름차단으로 인해 단일수제의 흐름특성과는 변화된 흐름을 갖게 될 것이다. 재순환 영역에서의 흐름특성은 수제간격 결정에 있어 근거자료로 제시할 수 없지만 흐름분리길이(S_L)와 흐름분리높이(S_h)에 의해 정의되는 재순환영역의 크기는 제방보호 효과의 한계를 정의하는데 의미를 둔다.

Fig. 7은 수제간격에 따른 흐름분리길이(S_L)를 비교한 그림으로서 흐름분리길이는 수제길이(l')로 무차원화 하였다. 실험결과 상향군수제에서의 흐름분리길이비는 8.1~11.3배 길이로 나타났으며, 4~6배 간격에서 8.5배의 흐름분리길이가 발생하고 있는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 8은 수제간격에 따른 흐름분리높이와의 관계를 비교한 그림으로 흐름분리높이는 수로의 폭(B)으로 무차원화 하였다. 흐름분리높이는 수제의 간격이 증가함에 따라 수로폭의 0.19~0.23배의 폭을 갖는 것으로 나타났다. 수제의 간격증가에 따른 재순환영역의 높이변화는 서서히 증가하고 있으나 그 차이는 미미한 것으로 나타났으며, Fr에 따른 흐름분리높이 또한 차이점이 발견되지 않았다. 이와 같은 결과를 통해 후면부 수제의 간격 조절에 따른 흐름억제를 통해 수제 설치시 재순환흐름의 규모를 선정하는데 있어 일정부분 범위를 제어할 수 있을 것으로 기대한다.

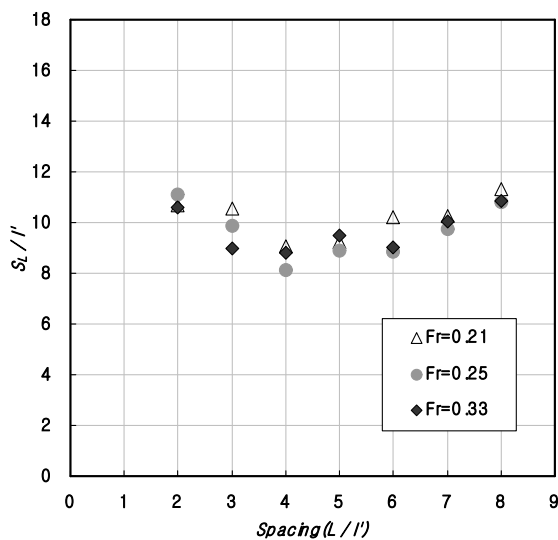


Fig. 7. Relationship of S_L and Groyne Spacing

4.3 수제간격에 따른 제방부 유속변화

수제역내의 재순환흐름으로 인한 유속저감은 제방주변의 유속을 완화시켜 제방을 보호하는 역할을 하게 된다. 따라서 수제설치로 인한 재순환영역내 제방주변에서의 유속은 반드시 검토해야할 항목이다. 수제간격에 대한 제방부 흐름분석은 수제간격에 따라 형성되는 수제역내 재순환영역의 흐름을 대상으로 하안선(제방)을 따라 발생하는 역방향 흐름에 대하여 분석하였다. 하안을 따라 형성되는 역류속은 최대한 제방에 근접하여 발생하는 측선($y/B=0.01$)을 대상으로 분석하였다. 제방부유속은($|U_{le,max}|$)는 상류 접근유속(U_{app})으로 무차원화한 수치를 적용하였으며 최대제방유속 발생거리($L_{e,max}$)는 수제길이(l')로 무차원화 하였다.

설치간격에 따른 제방근처 최대유속비($|U_{le,max}|/U_{app}$)의 변화는 Fig. 9와 같다. KICT (2009)에 의하면 단일로 설치된 연직수제에서의 최대 제방부 유속은 0.50배 이내로 발생한다고 하였으며, Kang et al. (2006)은 2개의 연직군수제에서의 최대 제방부 유속이 0.78배로 관측된다고 하였다. 그러나 상향 군수제의 경우 수제의 설치간격이 증가할수록 제방부 유속은 선형적으로 증가하고 있으며 유입부 유속의 최대 0.59배로 역류속이 발생하고 있는 것으로 나타났다. 제방부 최대유속 발생위치는 Fig. 10과 같이 간격에 따라 위치변화를 보여주고 있지만 수제간격이 6배 이상일 경우 최대유속 발생위치의 변화가 없는 것으로 나타났다. 강하게 역류하는 재순환흐름으로부터 제방 및 저수호안의 침식을 방지하기 위해서는 저수호안의 상태를 고려할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 제방주변 유속의 최대유속비를 0.4 이내로 제한한다면 적정수제

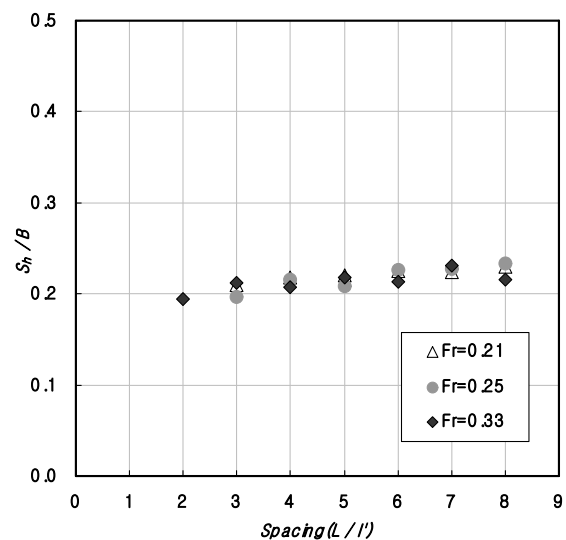


Fig. 8. Relationship of S_h and Groyne Spacing

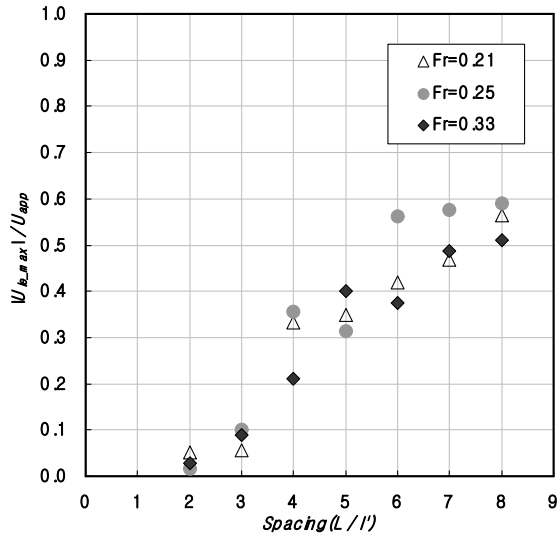


Fig. 9. Relationship of U_{le-max} and Groyne Spacing

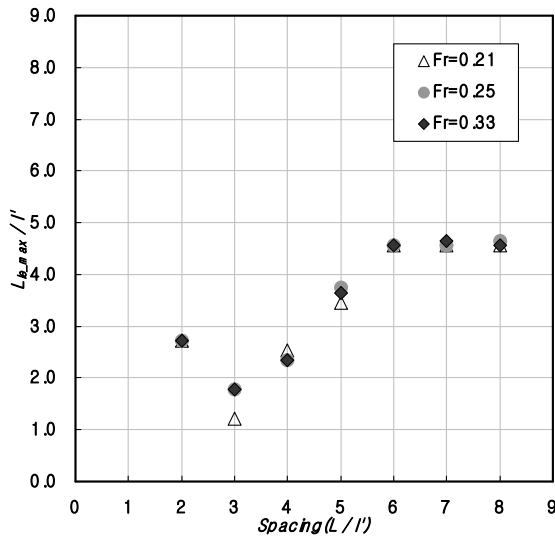


Fig. 10. Relationship of L_{le-max} and Groyne Spacing

의 간격은 6배 이하로 설치하는 것을 제안한다.

4.4 수제간격에 따른 회전류 중심점 위치 변화

수제역내 재순환영역에 발생하는 회전류의 위치분석은 흐름특성에 있어 의미를 갖는다. 재순환흐름영역에서는 회전류를 중심축으로 하는 재순환흐름의 주변에서 가장 강한 흐름특성들이 발생하고 있는데 주흐름영역에서의 최대유속 발생위치와 재순환영역에서의 최대제방부 유속이 회전류 중심점의 위치와 연관이 있다. 이는 흐름특성으로 인한 재순환영역과 수제역내 하상을 변화시키는 주요인자일 뿐 아니라 제방침식을 야기시키는 주요인자이다. 따라서 회전류 중심점의 형성위치를 파악하는 것은 수제간격 제시를 위해서는 반드시 검토해야할 항목 중의

하나이다. 회전류의 형성위치를 검토하기 위해 회전류의 중심점을 기준으로 하여 수제끝단으로 부터의 거리(L_v)에 대하여 검토하고자 하였다. Fig. 11은 수제간격에 따른 회전류 중심점 발생위치와의 관계를 나타낸 그림으로써 회전류형성거리(L_v)는 수제길이(l')로 무차원화 하여 비교하였다. 회전류의 형성위치는 상향수제에서 수제간격이 증가함에 따라 설치간격이 6배인 지점까지 증가함을 보이다가 6배 이상이 되면 변화폭이 둔감해진다. 이는 수제간격이 6배 이상이 되면 중심점의 위치는 변화하지 않고 재순환흐름의 길이만 증가한다는 것을 의미한다.

Fig. 12는 군수제주변에서 발생하는 주흐름구간의 최대유속 발생위치(L_{ch-max}), 재순환영역에서의 제방부 최

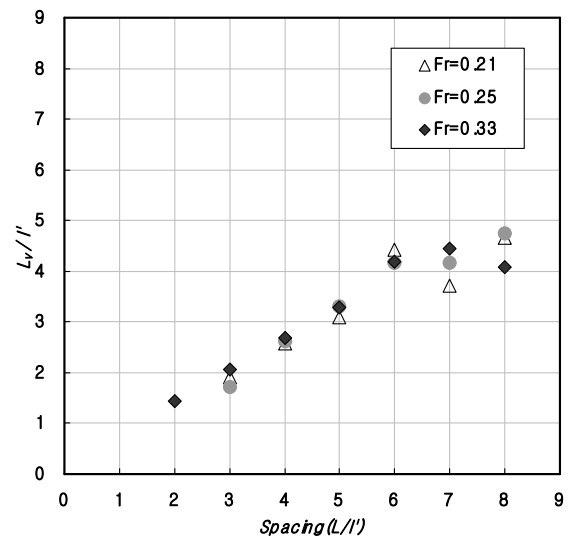


Fig. 11. Relationship of L_v and Groyne Spacing (x-direction)

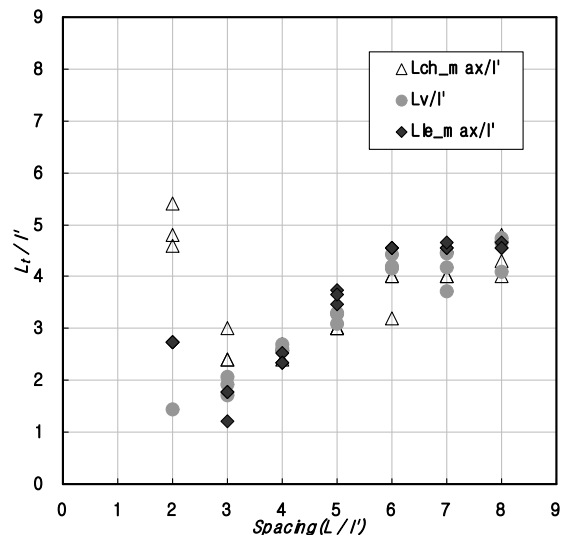


Fig. 12. Relationship of L_t and Groyne Spacing

대유속 발생위치($L_{le,max}$)와 회전류 형성위치(L_v)간의 관계를 검토하기 위해 통합적으로 나타낸 그림이다. 위의 3가지 흐름특성에 대한 변수는 통합거리(L_t)로 명명하여 수제길이(l')로 무차원화 하였다. 비교결과 회전류의 형성으로 인해 발생하는 최대유속의 발생위치는 회전류의 중심점이 위치하는 수로방향 거리와 비교적 높은 연관성을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 이는 수제역내 재순환 흐름이 폭방향으로 짧은 길이를 갖는 타원형태의 회전류가 발달하기 때문에 길이방향에 비해 폭방향에서의 에너지가 높게 형성이 되기 때문이며, 이로 인해 주흐름을 가속시키는 원인이자로서 간주할 수 있을 것이다. 이러한 결과로 보았을 때 회전류 중심점의 형성 위치에 따라 최대유속 발생위치를 가늠할 수 있을 것으로 판단되며 수제간격을 결정하는데 있어 참고자료로 활용할 가치가 충분이 있을 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 상향 군수제의 적정 설치간격 제시를 위하여 간격 변화에 따른 수제주변 흐름특성을 수리실험을 통해 분석하였다. 수제간격에 따라 변화되는 흐름특성은 주흐름영역과 재순환영역으로 구분하였으며, 이에 따른 흐름특성인자를 정의하여 분석하고 다음과 같은 실험결과를 도출하였다.

- 1) 주흐름구간에서는 수제설치로 감소된 통수능으로 인해 유속이 가속되어 하상안정성에 영향을 미칠 수 있는 최대유속비($U_{ch,max}/U_{app}$) 변화 및 발생위치를 검토하였다. 최대유속비는 유입부 유속의 1.57~1.78 배 까지 증가하는 것으로 나타났으며, 수제간격이 3배일 경우 최대유속발생위치는 수제길이의 2.3~3.0 배 간격에서 발생하는 것으로 확인되었다. 따라서 하상보호 및 구조물의 안정성확보 측면을 고려한다면 4배 이상의 간격을 확보할 필요가 있을 것으로 판단된다.
- 2) 재순환흐름영역에서는 제방보호효과의 한계로 정의되는 재순환흐름에서의 크기에 대하여 분석하였다. 실험결과 수제의 간격변화로 인한 흐름분리길이(S_L)의 변화를 확인하였으며 이를 통해 재순환흐름의 규모를 제어하는데 유용한 자료로 이용할 수 있을 것으로 기대한다.
- 3) 설치간격에 따른 제방근처 최대유속비($|U_{le,max}|/U_{app}$)는 유입부 유속의 최대 59%의 역유속이 발생하는 것으로 확인되었다. 하안 및 호안보호를 위한 제방

주변 최대유속비를 40% 이내로 제안한다면 적정수제의 간격은 6배 이하로 설치하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

- 4) 수제역내 발생하는 재순환흐름의 중심점 주변에서는 주흐름영역 및 재순환흐름영역을 대표하는 최대유속과 제방부 최대 역유속이 발생한다. 회전류의 중심점이 형성되는 위치는 수제간격이 증가함에 따라 6배까지 하류단으로 이동하다가 그 이상이 되면 위치의 변화가 없는 것으로 확인되었다. 회전류의 중심점 형성 위치는 최대유속 발생위치를 가늠할 수 있는 중요한 자료로써 수제간격을 결정하는데 있어 활용가치가 충분히 높을 것으로 사료된다.
- 5) 위와 같은 실험결과를 통해 수제설치에 따른 유속저감, 하상안정성 확보, 수제역내 역류로 인한 제방안정성 확보 등을 고려하였을 때 상향수제의 적절한 설치간격은 최소 4배에서 최대 6배의 수제간격을 확보할 것을 제안한다. 추후 군수제 설치에 따른 수심별 유속분포와 하상변동실험을 통해 보완된다면 보다 명확한 수제의 간격을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원에서 수행하는 다방향 흐름 감세 장치 개발사업 중 “보하류부 세굴방지를 위한 Multi-Baffle Dissipator 개발(2014-0110-1-1)” 과제의 지원을 받아 수행된 연구이며 이에 감사드립니다.

References

- Acheson, A.R. (1968). *River Control and Drainage in New Zealand*. Ministry of Works, New Zealand.
- Ahmad, M. (1953). “Experiments on the Design and Behavior of Spur Dikes.” *Proceedings, Minnesota International Hydraulics Convention ASCE*, New York, pp. 145-159.
- Copeland, R.R. (1983). “Bank Protection Techniques Using Spur Dikes.” *Miscellaneous paper HL83-1*, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station. pp. 7-8.
- Ettema, R., and Muste, M. (2004). “Scale Effect in Flume Experiments on Flow Around a Spur Dike in Flatbed Channel.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 130, No. 7, pp. 635-646.

- FHWA (1985). *Design of Spur-type Streambank Stabilization Structures*. U.S. DOT, FHWA, Rep. No. FHWA/RD 84/101, McLean, VA. pp. 60-72.
- HR Wallingford. (1997). *Guidelines on the geometry of groynes for river training*. HR Wallingford, Report SR493, October. pp. 1, pp. 9-10.
- Kang, J.G., Yeo, H.K., and Kim, S.J. (2005). "An Experimental Study on Tip Velocity and Downstream Recirculation Zone of Single Groyne Conditions." *Korea Water Resources Association*, Vol 38, No. 2, pp. 143-153.
- Kang, J.G., Yeo, H.K., and Roh, Y.S. (2006). "An Experimental Study on Characteristics of Flow around Groynes for Groyne Spacing." *Journal of the Korean Society of Civil Engineering*, Vol 26, No. 3B, pp. 271-278.
- KICT. (2009). *River Structure Design Techniques for Harmonizing Nature with the Human*. Report No. 2009-066, Korea Institute of Construction Technology, pp. 85-94.
- KICT. (2011). *River Structure Design Techniques for Harmonizing Nature with the Human*. Report No. 2011-090, Korea Institute of Construction Technology, pp. 30-47.
- Richardson, E.V., and Simons, D.B. (1974). *Spurs and Guide Banks*. Open File Report, Colorado State University Engineering Research Center, Fort Collins, Colorado, February.

논문번호: 14-030	접수: 2014.03.20
수정일자: 2014.04.16	심사완료: 2014.04.16