

극치통계분석을 이용한 교량상판 풍하중에 대한 차량주행 안전도 평가

정 지 승

동양대학교 철도토목학과
(2010. 4. 1. 접수 / 2010. 5. 3. 채택)

Driving Safety Analysis for vehicles Against High Wind on the Bridges Using Extreme Value Statistics

Jee-Seung Chung

Department of Railroad Civil Engineering, Dongyang University
(Received April 1, 2010 / Accepted May 3, 2010)

Abstract : This study presents a methodology to evaluate the driving safety of vehicles against localized high wind on the roads over the valleys or along the coasts. Risk level for vehicle accident is derived from the side slip caused by cross wind, and then safety criteria based on reliability for driving stability are defined. The level of safety is classified according to probability of exceeding against wind speed using the concept of extreme value statistics. To attain the safety level of vehicle on bridges, numerical simulations using Computational Fluid Dynamics(CFD) are performed. Based on this result, risk reduction and quality improvement is expected through analysis for each alternative in bridges design, construction and operation & maintenance stage with proposed process.

Key Words : bridge, vehicles, extreme value statistics, wind, safety

1. 서 론

최근에 건설기술의 발전과 더불어 장대교량의 건설이 많아지고 있으며 이러한 대형교량의 경우 대부분 해안이나 산악지역에 건설되어 강풍으로 인한 주행하는 차량의 파손이나 인명피해가 발생하고 있다. 서해안, 중앙, 영동고속도로 등은 해안 및 산악 지대를 통과하는 노선으로서 지역특성상 교량상판의 강풍으로 인한 안전운행의 저하라는 문제점들이 제기되고 있다. 선진국의 경우도 도로구조의 개선이나 차량성능의 향상 등의 많은 발전이 있음에도 불구하고 도로에서 발생하는 사고의 2% 정도가 바람에 의한 것이라는 최근 통계가 있다⁵⁾. 국내에서도 횡풍에 의한 차량의 안전성을 확보하기 위한 통행제한 풍속을 다양한 방법을 통해 연구되고 있다²⁻⁴⁾. 본 연구에서는 기존의 연구를 기반으로 통행제한 풍속을 보다 합리적으로 적용하기 위해 극치통계분석기법을 이용한 방안을 제시하였다. 먼저, 전산유체해석을 통한 교량상판의 풍속을 구하고 향후 발생할 수 있는 제한풍속의 발생확률을

산정하여 강풍에 대한 차량주행의 안전성 확보 방안의 기준을 마련하고자한다.

2. 차량통행제한 기준

해안가나 계곡 등에서 교량상판에 강한 횡풍이 발생할 경우 차량주행의 안전성에 문제가 발생할 가능성이 높아지고, 운전자의 운전미숙이나 과도한 조정으로 자동차의 제어가 불가능해 질 수 있다. 따라서, 교량상판의 자동차에 특정 풍속을 초과하는 경우에는 안전을 위하여 차량의 통행을 제한할 필요가 있다. 아울러 통행 제한까지는 아니더라도 상당한 풍속의 바람이 분다면 차량속도를 특정치 이하로 제한하여 운행을 유도해야 한다.

2.1. 외국기준

우리나라보다 일찍 도로 시설을 정비한 선진국의 경우에 이러한 문제들에 대한 대책을 일부 강구하고 있다. Table 1은 영국 주요 교량의 차량 속도제한 풍속을 나타낸 것이고, Table 2는 영국의 주요 교량에서 실시하고 있는 통행제한 풍속을 나타낸 것으로 대부분의 교량에서 10분 평균 풍속이

18m/s를 넘어가면 속도 제한을 실시하고 있으며, 36m/s 이상인 경우에는 모든 차량의 통행을 금지하였다²⁾.

2.2. 국내기준

국내에서는 도로공사에서 고속도로를 주행하는 차량의 횡풍에 대한 주행안전성을 확보하기 위한 목적으로 차량통행제한 기준(안)을 제정하였다²⁾. 기준(안)의 적용대상은 고속도로를 주행하는 승용 및 소형 승합차로 한정한다. 바람이 차량 옆면에 작용하는 대상으로 적용하고, 풍압은 차량높이의 무게중심에 적용하므로 편의상 바람은 차량 높이의 절반 위치로 환산해야 한다. 풍속은 기본적으로 10분 평균풍속이나 풍속이 급변하는 구간에서는 3초 평균풍속으로 간주한다. 승용 및 소형승합차의 경우에 Table 3의 기준에 따라 단계별 속도제한 및 통행제한을 실시한다. 그러나 국내기준(안)의 경우 영국기준과 비교할 경우 다소 안전측으로 고려되었기 때문에 향후 경제성 분석을 통해 개선할 여지는 있다.

Table 1. Wind speed to limit vehicular traffic for major bridge of the UK

교량명	10분 평균풍속	제한속도
Forth교	18.0m/s	64Km/h
Humber교	18.0m/s	64Km/h
Severn교	16.0m/s	56Km/h
Erskine교	12.5m/s 22.0m/s	80Km/h 45Km/h
Ouse교	18.0m/s	64Km/h
Redheugh교	20.0m/s	72Km/h

Table 2. Plan of wind speed to limit vehicular traffic for major bridge of the UK

풍속	대책
15m/s	속도 제한이나 차선제한을 고려
18m/s	한 차선을 통제
20m/s	탑차의 교통 통제를 고려
23m/s 이상	탑차의 통행금지, 트레일러 및 대형차량 통행제한
26~36 m/s	앞으로 3시간 동안의 기상예보에 따라 조치
36m/s 이상	모든 차량의 통행 금지

Table 3. Plan of wind speed to limit vehicular traffic in domestic

풍속	대책
15m/s	속도제한: 70km/h
20m/s	속도제한: 50km/h
25m/s	통행제한

3. 강풍에 의한 차량주행 안전도 평가방법

3.1. 극치통계분석

통행제한 풍속(25m/s)에 대한 초과확률을 구하기 위해서는 확률모형을 구성할 만한 충분한 기상자료를 확보해야 한다. 현장의 풍속을 추정하기 위해서는 실제로 측정된 기상관측자료와 비교하는 것이 가장 좋지만 신설구간의 경우에 실측하는 것이 불가능한 경우가 대부분이다. 따라서 이러한 경우에는 상당한 오차를 포함하지만 인근 기상관측소의 풍속 및 풍향자료를 기초로 하여 최대치를 분석해서 어떤 값 이상이 발생할 확률을 미리 예측하기 위한 극치통계분석 모델을 제안하였다. 극치통계분석 모델에는 다음 3가지 Type이 존재한다.

- Type I (Gumbel Type): 원래 데이터의 최대치부근의 확률분포가 지수형태로 감소하는 경우
- Type II (Frechet Type): 원래 데이터의 최대치부근의 확률분포가 다항식함수의 형태로 감소하는 경우
- Type III (Weibull Type): 원래 데이터의 최대치부근의 확률분포의 한계가 존재하는 경우

우리나라의 풍속에 대한 확률분포를 조사한 연구에 따르면 국내의 풍속에 가장 적합한 극치통계분석 모델이 Type I로 국내의 풍속을 잘 묘사하고 있다²⁾. 따라서 본 연구에서도 Type I(Gumbel Type)을 확률모형으로 사용하고자 한다. Type I에 대한 누적확률밀도함수는 식 (1)과 같다.

$$F_X(x) = \exp[-e^{-\alpha(x-u)}] \quad (1)$$

여기서 α , u 는 상수이다.

3.2. 극치통계 분석을 이용한 강풍에 대한 차량주행 안전도 평가방법

강풍에 대한 차량주행의 안전도를 평가하기 위해서 풍속에 대한 예측이 필수적이지만 설계 시에는 정확한 예측이 불가능할 수도 있다. 이때는 인근 기상관측소의 풍속 및 풍향자료를 수집 하는데 도로교설계기준에 따른 국부적인 지형의 영향을 보정해준다. 만약 측정이 가능하다면 실측한 풍향 풍속과 인근 기상관측소 자료와 상관성을 조사한다. 그리고 실질적으로 차량에 영향을 주는 풍속은 교량에 작용하는 풍속이 아니라 교량상판에서 차량의 중심부에 작용하는 풍속이므로 전산유체해석을 통해 차량에 대한 작용풍속을 산정한다. 이는 동일한

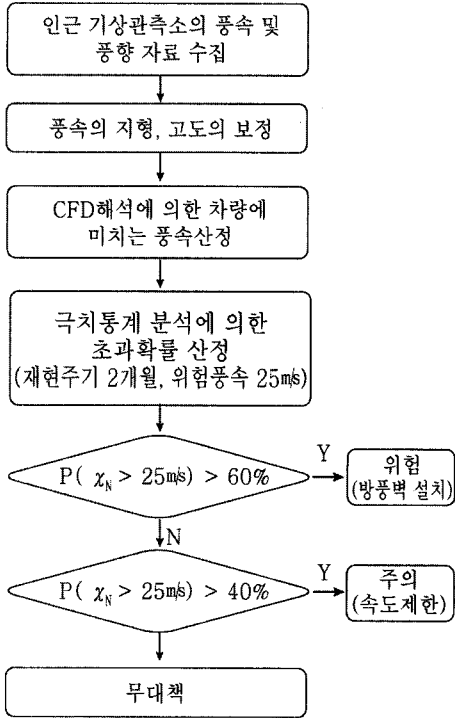


Fig. 1. Flowchart.

풍속이라도 교량의 단면 형상에 따라 교량상판에서의 풍속은 상이하기 때문이다. 차량주행 안전도 평가를 위해 관측 및 보정을 통한 교량상판의 과거풍속자료를 기반으로 재현주기 2개월에 해당하는 TYPE I에 대한 극치통계분석을 통한 통행제한 풍속(25m/s)에 대한 초과확률을 산정한다. 이에 대한 일련의 과정을 다음의 순서에 따르며 Fig. 1은 극치통계분석에 따른 안전도 평가 순서를 나타내었다.

- ① 인근 기상관측소의 풍속 및 풍향자료 수집
- ② 지표상황에 따른 풍속의 보정
- ③ 전산유체해석에 의한 차량위치의 풍속산정
- ④ TYPE I 극치통계분석에 의한 통행제한풍속 초과 확률산정

3.3. 풍속의 보정

현장의 풍속에 영향을 미치는 인자로는 풍속의 평균시간, 지표면으로부터의 고도, 주위 지형의 조도 등이 있다. 풍속의 평균시간은 기본적으로 기상자료가 10분 평균을 사용하므로 통일이 된다. 하지만 지표면으로부터의 고도에 따라서도 풍속이 많이 바뀌므로 적절한 보정이 필요한데 도로교설계기준에 따르면 식 (1)과 Table 4의 변수에 의해서

Table 4. Parameters of α , z_G , z_b

구분	지표상황	α	z_G (m)	z_b (m)
I	· 해상, 해안	0.12	500	5
II	· 개활지, 농지, 전원 · 수목과 저층건물이 산재하여 있는 지역	0.16	600	10
III	· 수목과 저층건물이 밀집하여 있는 지역 · 중,고층 건물이 산재하여 있는 지역 · 완만한 구릉지	0.22	700	15
IV	· 중,고층 건물이 밀집하여 있는 지역 · 기복이 심한 구릉지	0.29	700	30

보정하도록 규정하고 있다.

$$V_d = 1.925 \left[\frac{z}{z_G} \right]^\alpha V_{10}, \quad z \geq z_b \quad (2)$$

$$= 1.925 \left[\frac{z_b}{z_G} \right]^\alpha V_{10}, \quad z < z_b$$

3.4. 전산유체해석에 의한 차량위치의 풍속산정

교량을 주행하는 차량에 횡방향으로 작용하는 풍력을 측정하기 위해서는 풍동실험과 수치해석방법이 있다. 풍동실험의 경우 계측을 위해서 고려해야 하는 많은 현실적인 문제들, 실험시간 및 비용문제 등으로 인하여 차량에 미치는 다양한 인자를 얻기가 까다롭다. 따라서 본 연구에서는 전산유체해석에 기초한 수치해석을 수행하여 차량에 미치는 횡방향 풍속을 산정한다.

3.5. 극치통계분석에 의한 통행제한풍속 초과확률 산정

X가 분포함수 $F_X(x)$ 를 가지는 초기 모집단이라면 X로부터 표본크기 n에서 최대치에 대한 누적밀도함수는 다음 식 (3)과 같다

$$F_{X_n}(x) = [F_X(x)]^n \quad (3)$$

만약 초기분포가 Type I 점근분포라면 다음 식 (4), (5)와 같다.

$$F_X(x) = \exp[-e^{-\alpha(x-u)}] \quad (4)$$

$$F_X(x) = \exp[-e^{-\alpha(x-u-\ln n/\alpha)}] \quad (5)$$

기준에 관측된 값 중에서 가장 큰 값을 y_n 이라고 하고 재현주기 N에 대한 가장 큰 값들의 분포는 다음 식 (6)과 같다.

$$F_{X_n}(x) = \exp[-e^{-\alpha(x-y_n - \ln(N/n)/\alpha)}] \quad (6)$$

따라서 재현주기 N에 대한 특정한 값 25m/s를 초과할 확률은 다음 식 (7)과 같다.

$$p(x > 25\text{m/s}) = 1 - \exp[-e^{-\alpha(25\text{m/s}-y_n - \ln(N/n)/\alpha)}] \quad (7)$$

3.6. 강풍에 의한 사고 위험구간 판정기준

교량상판에서의 횡풍속이 제한풍속을 넘으면 차량의 주행안전성이 위험하다고 볼 수 있다. 따라서 사고가능성이 높은 풍속에 대해 방풍대책의 기준으로 결정할 수 있다. 본 논문에서는 특정 지역에 일년중 풍속 및 교량 상판에서의 풍속이 위험풍속을 넘는 기간에 대한 기준을 한국도로공사에서 사용하고 있는 “고속도로 사고다발지역 선정기준”으로 적용한다. 이 기준에 따르면 동일한 장소에서 동일한 원인으로 일년에 6회 이상의 사고가 발생하면 위험구간으로 판단하여 도로구조 등을 개선하도록 하고 있다. 이 기준을 강풍에 의한 차량주행 안전도 평가에 적용하기 위하여 재현주기 1/6년(2개월)에 대한 초과확률을 산정한다. 도로교설계기준에 근거하여 설계풍속은 TYPE I분포의 재현주기에 대한 비초과확률 60%를 적용하였다. 따라서 본 논문에서도 초과확률 60%를 “위험”, 40%를 “주의”로 정의하고 이에 따라 방풍벽설치의 기준으로 정하였다.

4. 설계예제

본 연구에서는 동일한 풍속이라도 단면형상에 따라 교량 상판에서의 횡풍은 다르게 발생한다는 관점에서 교량에 작용하기전의 풍속이 아닌 교량 단면변화에 따른 교량상판에서의 강풍에 대한 차량주행 위험도 분석을 실시하고자 한다.

4.1. 설계조건

적용 예에 사용된 교량은 사장교로서 풍속자료는 목포지역의 기상자료를 사용하였고 교량단면은 시공성이 양호하여 사장교 설계에 일반적으로 사용되고 있는 사각형 단면(rectangular section)과 최근 사장교 설계에 사용되고 있는 유선형 단면(streamlined section)을 Fig. 2와 같이 적용하였다.

4.2. 전산유체해석에 의한 교량상판 차량에 작용하는 풍속

각각의 단면에 대해 전산유체해석을 실시하여

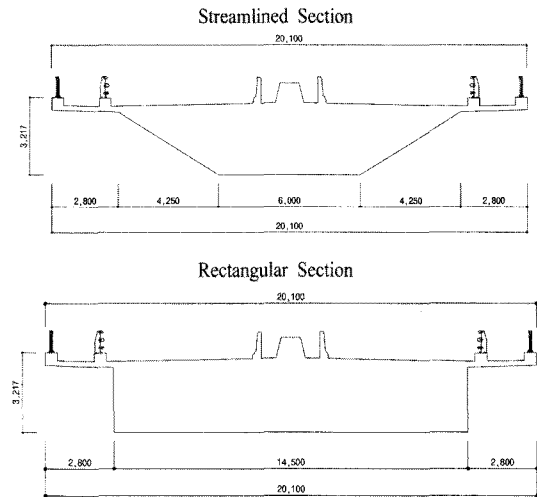


Fig. 2. Section types of bridges.

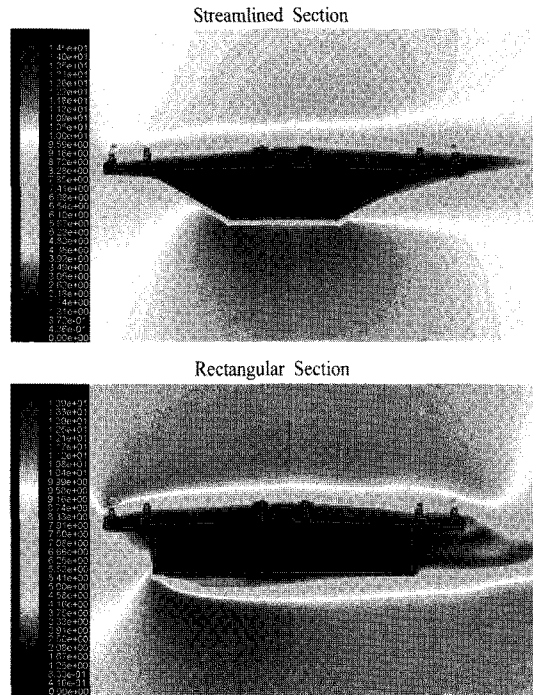


Fig. 3. Distribution of wind speed using CFD.

교량단면 주위의 풍속을 산정하였다. Fig. 3은 전산 유체해석을 통한 풍속분포를 나타낸 것이고, Table 5는 관측자료에 대한 보정풍속 및 교량상판에서 차량에 발생되는 풍속을 정리한 것이다⁶⁾.

4.3. 평가결과

차량에 작용하는 풍속을 기준으로 통행제한기준(안)의 풍속에 대한 TYPE I 분포의 극치통계분석

Table 5. Distribution of wind speed for vehicle on bridges

년 도	관측소 풍 속	지형고도 보정풍속	차량에 작용 풍속(m/s)			
			유선형단면		사각형단면	
			소형차	대형차	소형차	대형차
1971	30.0	42.0	28.1	44.0	21.5	47.8
1972	26.0	36.4	24.4	38.1	18.6	41.4
1973	25.0	35.0	23.4	36.6	17.9	39.8
1974	18.2	25.5	17.1	26.6	13.0	29.0
1975	19.2	26.9	18.0	28.1	13.8	30.6
1976	19.7	27.6	18.5	28.8	14.1	31.4
1977	18.3	25.6	17.2	26.8	13.1	29.1
1978	19.7	27.6	18.5	28.8	14.1	31.4
1979	21.0	29.4	19.7	30.8	15.0	33.5
1980	23.7	33.2	22.2	34.7	17.0	37.8
1981	18.3	25.6	17.2	26.8	13.1	29.1
1982	18.3	25.6	17.2	26.8	13.1	29.1
1983	19.3	27.0	18.1	28.3	13.8	30.7
1984	15.2	21.3	14.2	22.2	10.9	24.2
1985	22.7	31.8	21.3	33.2	16.3	36.2
1986	25.7	36.0	24.1	37.6	18.4	41.0
1987	24.8	34.7	23.3	36.3	17.8	39.5
1988	20.0	28.0	18.7	29.3	14.3	31.9
1989	18.8	26.3	17.6	27.5	13.5	29.9
1990	21.3	29.8	20.0	31.2	15.3	33.9
1991	19.3	27.0	18.1	28.3	13.8	30.7
1992	17.3	24.2	16.2	25.3	12.4	27.6
1993	18.7	26.2	17.5	27.4	13.4	29.8
1994	20.0	28.0	18.7	29.3	14.3	31.9
1995	20.3	28.4	19.0	29.7	14.5	32.3
1996	18.5	25.9	17.3	27.1	13.3	29.5
1997	19.0	26.6	17.8	27.8	13.6	30.3
1998	18.7	26.2	17.5	27.4	13.4	29.8
1999	20.5	28.7	19.2	30.0	14.7	32.7
2000	21.4	30.0	20.1	31.3	15.3	34.1
2001	17.2	24.1	16.1	25.2	12.3	27.4
2002	29.1	40.8	27.3	42.6	20.9	46.4
2003	20.8	29.1	19.5	30.5	14.9	33.1
2004	17.2	24.1	16.1	25.2	12.3	27.4
2005	19.3	27.0	18.1	28.3	13.8	30.7
2006	17.0	23.8	15.9	24.9	12.2	27.1

을 통해 재현주기 1/6년(2개월)에 대한 초과확률을 산정하여 Fig. 4에 결과를 정리하였다.

소형차의 경우 유선형 단면이 저풍속 및 고풍속에 대해 사각형 단면에 비해 다소 높은 초과확률이 나타났다. 이는 단면의 유선형으로 인해 교량상판의 낮은 높이에서 강한 풍속이 발생하기 때문이라

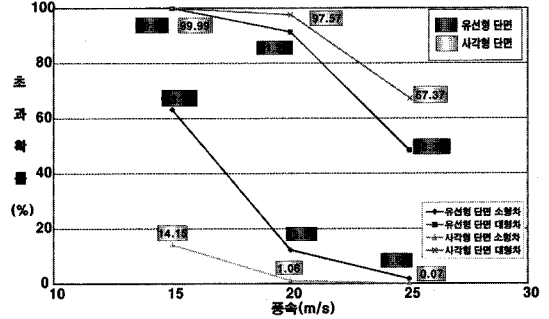


Fig. 4. Probability of exceeding against wind speed.

고 판단된다. 하지만 통행제한 풍속인 25m/s에 대한 초과확률이 1.68%로 안전한 것으로 나타났다. 대형차의 경우는 사각형 단면이 유선형 단면보다 초과확률이 크게 산정되었다. 이는 교량의 단면형상에 따라 난류발생의 범위가 차이가 있고 풍속에도 영향을 미치기 때문인 것으로 판단되며 재현기간 1/6년(2개월)에 대한 풍속인 25m/s를 초과하는 확률이 유선형 단면의 경우는 48.37%로 “주의”에 해당되며, 사각형 단면의 경우는 67.37%로 “위험”에 해당하여 방풍벽설치가 필요하다고 판단된다. 이와같이 동일한 풍속이라도 교량단면의 형상에 따라 차량주행의 안전도가 다르게 평가된다.

5. 결론

본 연구에서는 교량구간에 횡풍이 작용할 때 극치통계분석을 이용한 주행차량의 안전도를 평가하는 새로운 평가방법을 제시하였다. 본 평가방법을 단면형상이 다른 사장교에 적용하여 안전도 평가를 실시하였다.

1) 동일한 풍속이 작용하더라도 소형차의 경우 유선형 단면이 저풍속 및 고풍속에 대해 사각형 단면에 비해 다소 높은 초과확률이 나타났다. 이는 단면의 유선형으로 인해 교량상판의 낮은 높이에서 강한 풍속이 발생하기 때문이라고 판단된다.

2) 대형차의 경우는 사각형 단면이 유선형 단면보다 초과확률이 크게 산정되었다. 이는 교량의 단면형상에 따라 난류발생의 범위가 차이가 있고 풍속에도 영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다.

3) 재현기간 1/6년(2개월)에 대한 풍속인 25m/s를 초과하는 확률이 유선형 단면의 경우는 48.37%로 “주의”에 해당되며, 사각형 단면의 경우는 67.37%로 “위험”에 해당하여 방풍벽설치가 필요하다고 판단된다.

본 연구에서 제안하는 횡풍에 대한 교량상판에서의 차량주행 안전도 평가방법은 교량자체의 내풍 안전성과 별도로 교량상판을 주행하는 차량의 안전도를 평가함으로써 횡풍에 대한 차량사고의 위험을 줄이는 합리적인 방안을 제공할 것으로 기대된다.

참고문헌

- 1) (사)대한토목학회, “도로교설계기준”, 2008.
- 2) 정운용, 정봉조, 박태규, “고속도로 강풍지역 차량주행 안전성 확보방안 연구”, 한국도로공사, 2003.
- 3) 권순덕, 정운용, “강풍에 의한 차량 주행 안정성 평가”, 2003년 대한토목학회 논문집 대한토목학회, 제23권, 제5A호, pp. 977~984, 2003.
- 4) 권순덕, 정운용, 박태규, “횡풍을 받는 차량의 주행 안정성 확보를 위한 안전기준의 제안”, 2003년 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 대한토목학회, pp. 805~809, 2003
- 5) Smith, B.W.and Barker, C.P., Design of wind screens to bridge, experience and application on major bridges, Proc. the International symposium on advances in bridge Aerodynamics, A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 289~298, 1998.
- 6) 기상청 홈페이지(<http://www.kma.go.kr>).