

근적외선 분광법을 이용한 이탈리아 라이그라스 사일리지의 품질 평가

박형수¹ · 이상훈¹ · 최기춘¹ · 임영철¹ · 김종근¹ · 조규채² · 최기춘¹

Evaluation of the quality of Italian Ryegrass Silages by Near Infrared Spectroscopy

Hyung Soo Park¹, Sang Hoon Lee¹, Ki Choon Choi¹, Young Chul Lim¹, Jong Gun Kim¹,
Kyu Chea Jo² and Gi Jun Choi¹

ABSTRACT

Near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) has become increasingly used as a rapid and accurate method of evaluating some chemical compositions in forages. This study was carried out to explore the accuracy of near infrared spectroscopy (NIRS) for the prediction of chemical parameters of Italian ryegrass silages. A population of 267 Italian ryegrass silages representing a wide range in chemical parameters and fermentative characteristics was used in this investigation. Samples of silage were scanned at 2 nm intervals over the wavelength range 680~2,500 nm and the optical data recorded as log 1/Reflectance (log 1/R) and scanned in intact fresh condition. The spectral data were regressed against a range of chemical parameters using partial least squares (PLS) multivariate analysis in conjunction with spectral math treatments to reduced the effect of extraneous noise. The optimum calibrations were selected on the basis of the highest coefficients of determination in cross validation (R^2) and the lowest standard error of cross validation (SECV). The results of this study showed that NIRS predicted the chemical parameters with very high degree of accuracy. The R^2 and SECV were 0.98 (SECV 1.27%) for moisture, 0.88 (SECV 1.26%) for ADF, 0.84 (SECV 2.0%), 0.93 (SECV 0.96%) for CP and 0.78 (SECV 0.56), 0.81 (SECV 0.31%), 0.88 (SECV 1.26%) and 0.82 (SECV 4.46) for pH, lactic acid, TDN and RFV on a dry matter (%), respectively. Results of this experiment showed the possibility of NIRS method to predict the chemical composition and fermentation quality of Italian ryegrass silages as routine analysis method in feeding value evaluation and for farmer advice.

(Key words) : Near infrared reflectance spectroscopy (NIRS), Chemical composition, Fermentation quality, Italian ryegrass, Fresh silage)

I. 서 론

최근 축산 경영비 중 대부분을 차지하고 있는 사료비를 절감하기 위해서 정부는 자급 조

사료의 생산성 향상 및 생산기반 확충에 많은 노력을 기울이고 있다. 이렇듯 정부의 강력한 조사료 증산 정책에 힘입어 국내산 자급 조사료의 공급량이 늘어나면서 조사료의 유통물량

¹ 국립축산과학원 (National Institute of Animal Science, RDA, Cheonan, 330-801, Korea)

² 케이씨테크 (KC Tech. 503 Shin-Heung B/D Imae-Dong Bundang-Gu, Gyeonggi-Do, 463-806, Korea)

Corresponding author: Hyung Soo Park, National Institute of Animal Science RDA, Cheonan 330-801, Korea.
Tel: +82-41-580-6753, Fax: +82-41-580-6757, E-mail: anpark69@korea.kr

이 급속히 증가하고 있다. 하지만 현장에서 조사료의 품질을 신속하게 평가할 수 있는 조사료 품질관리체계가 미흡하여 품질이 불균일한 조사료가 유통되고 있어 생산자와 소비자 간의 품질에 대한 마찰이 빈번히 발생되고 있다. 조사료의 품질평가체계 미흡은 국내에서 생산된 조사료의 품질에 대한 불신으로 이어져 축산농가의 국내산 조사료의 이용 기피로 이어지고 있으며 또한 국내산 조사료의 유통 활성화를 저해하는 큰 요인으로 지적되고 있다. 따라서 현장에서 다량의 제품을 신속하고 정확하게 품질을 평가할 수 있는 기술개발이 필요한 실정이다.

최근 품질의 변이가 많은 농식품분야에서 다량의 제품의 품질을 신속하게 평가할 수 있는 기술로 근적외선분광법(NIRS)이 많이 이용되고 있는데 근적외선분광법은 비파괴 분석법으로 시료에 근적외선을 투여하면 각 유기성분마다 파장별로 흡수하는 빛의 양이 달라 이 차이를 이용해 성분별 함량 분석 등 품질 및 안전성을 검사하는 방법으로서 분석시간이 단축되고 동시에 여러 성분의 분석이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 현장에서 근적외선분광법을 이용하여 신속하게 품질을 평가하기 위해서는 원물시료를 바로 측정할 수 있는 기술이 매우 중요한데 기존의 근적외선분광법은 시료의 건조 분쇄과정을 거치는 시료의 전처리가 필요하여 시간 및 공간상 현장에서 직접 품질을 평가하기에는 다소 어려움이 있었다. 또한 사일리지의 경우 주요 발효품질의 평가항목인 수분, pH, 유기산 등은 건조과정 중에 휘발하여 소실되기 때문에 건조 분쇄 시료 상태로는 예측 정확성이 낮아질 수 있다. 하지만 사일리지 시료를 건조하지 않고 원물 그대로 발효품질을 평가하려는 연구들이 보고되고 있는데(Reeves and Blosser, 1989; Park et al., 1998) 건조하지 않은 원물시료는 수분, 입자도 및 충전 정도에 따라 스펙트럼의 변화를 초래함으로써 분석 정확성을 떨어뜨린다(Baker et al., 1994; Givens

et al., 1997)고 하였다. Gordon 등(1998)은 건조하지 않은 원물 사일리지를 분석하기 위한 시료의 전처리 방법에 따른 측정 정확성의 차이를 보고하였으며 Reeves와 Blosser(1991)은 사일리지 시료의 전처리 방법에 따른 정확성의 차이가 있음을 보고하였다. 하지만 근적외선분광법을 이용한 원물시료의 분석 가능성은 다양한 검량기법의 개발과 스펙트럼의 수처리 방법 및 시료 형태에 따른 스펙트럼 수집방법이 개선되면서 분석 예측능력에 많은 진전을 가져왔다(Geladi et al., 1985; Hruschka, 1987).

따라서 본 연구는 국내산 조사료의 신속한 품질평가방법으로서 근적외선분광법의 현장 이용성 및 건조 분쇄하지 않은 이탈리아 라이그라스 원물(생) 사일리지의 품질을 신속하게 평가하기 위한 근적외선 검량식을 개발하기 위하여 수행되었다.

II. 재료 및 방법

1. 시료 및 NIR 스펙트럼 수집

이탈리아라이그라스 사일리지 시료는 전국 동계사료작물 사일리지 품질경연대회에 출품된 것과 2010년부터 2012년 3월까지 조사료 생산경영체, 농축협 TMR 공장 및 생산농가에서 생산한 사일리지 450여 점을 수집하였으며, 수집된 시료는 NIR 스펙트럼 측정 전까지 -20°C 냉동고에 밀봉하여 보관하였다. 냉동된 이탈리아 라이그라스 사일리지 시료는 5°C 냉장고에서 해동하여 식물체를 가위로 5~7 cm 정도로 절단하여 직경 15 cm인 원형 시료컵에 약 100 g 정도를 충전하여 근적외선분광기(Spectrastar RTW 2,500)를 이용하여 680~2,500 nm의 파장범위에서 매 1 nm의 간격으로 반사도를 측정 후 검량식 유도를 위해서 흡광도($\log 1/R$: absorbance)로 변환시켜 수집하였다.

2. 사료가치 및 발효품질 분석

이탈리안 라이그라스 사일리지의 조단백질 함량은 AOAC (1990)법에 의거하여 Kjeldahl법 (Kjeltec™ 2400 Autosampler System)을 이용하여 분석하였고 NDF 및 ADF 함량은 Goering 및 Van Soest (1970)법에서 사용되어지는 시약을 이용하여 Ankom fiber analyzer (Ankom technology, 2005a; 2005b)로 분석하였다. 이탈리안 라이그라스 사일리지의 총 가소화영양소 (TDN) 함량은 $88.9 - (0.79 \times \text{ADF}\%)$ 에 의해서 산출하였고 상대적 사료가치 (RFV)는 ADF와 NDF가 건물 소화율 및 섭취량과 높은 상관관계를 가진다는 점에 근거하여 ADF와 NDF 분석치에 의한 계산식으로 산출하였다 (Holland et al., 1990). 사일리지의 pH 측정은 시료 25 g에 증류수 255 ml를 첨가하여 잘 혼합하여 electrometric pH meter (HI 9024; HANNA Instrument Inc., UK)를 이용하여 측정하였다. 젖산 분석은 사일리지 추출액을 Gas Chromatography (6890N, Agilent Co., USA)를 이용하여 Fussell 및 McCalley (1987)가 제시한 80/120 mesh Carboxpack, B-DA/4% Carbowax (Supelco Inc., Bellefonte, PA, Catalog No. 1-1889) 컬럼을 이용하여 분석하였다.

3. NIR 검량식 작성

검량식 작성 알고리즘은 시료의 스펙트럼에서 입자의 크기, 수분, 밀도 등 물리적 성질에 의한 산란효과에 대한 오차를 줄이기 위해 원시 스펙트럼을 Standard Normal Variate and Detrending (SNV-D) 전처리 기법과 수처리 (Math treatment) 기법을 이용하여 보정하고 회귀분석은 부분최소제곱법 (Partial Least Square)을 이용하여 검량식을 유도하였다. 통계적 처리는 상업용 프로그램인 Unistar (Unity, USA)를 이용하였다. 작성된 검량식의 예측 정확성에 대한 평가에는 검량식 결정계수 (Determination Coefficient, R^2), 검량식 표준오차 (Standard Error of Calibration, SEC), 상호검증표준오차 (Standard Error of Cross Validation, SECV)를 이용하였다. 최적의 검량식은 SECV가 가장 낮은 값을 갖는 것을 선택하였다.

III. 결과 및 고찰

1. NIR 스펙트럼의 특성

이탈리안 라이그라스 원물 사일리지 시료의 근적외선 영역에서의 NIR 스펙트럼과 1차 미분 스펙트럼은 Fig. 1에서 보는바와 같다. 시료

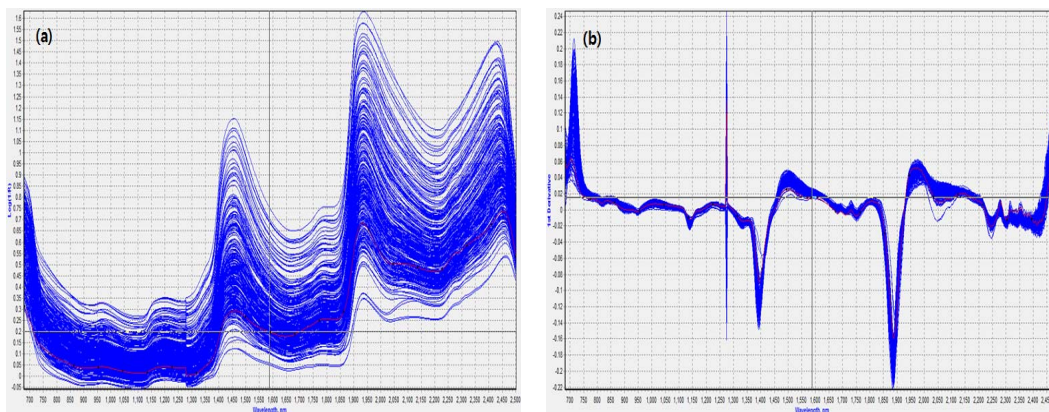


Fig. 1. NIR original spectrum as log 1/R (a) and as a first derivative (b) for fresh Italian ryegrass silages.

의 근적외선 스펙트럼은 광원으로부터 근적외선 빛이 시료에 조사되면 시료는 분자 내 결합의 진동에 관련된 파장의 빛을 흡수하여 해당 파장의 빛의 강도가 감소한다. 이러한 강도의 변화는 시료내 특정물질의 농도와 관련이 되며 그 변이는 검출기에 의해 검출되고 흡수 스펙트럼으로 측정되어진다.

이탈리안 라이그라스 사일리지의 근적외선 배역대에서의 흡수 스펙트럼을 살펴보면 1,400~50과 1,900~50 nm 배역대에서 흡수피크가 가장 크게 나타났으며 나머지 성분들에 대한 흡수 스펙트럼은 큰 차이를 보이지 않았다. Deaville과 Flynn (2000)은 사일리지의 근적외선 스펙트럼의 성분별 주요 흡수 배역대는 수분 함량은 1,450과 1,940 nm에서 흡수가 일어나고 탄수화물은 2,100과 1,600 nm, 단백질은 2,180과 2,055 nm 배역대에서 흡수가 일어난다고 하였다. 또한 세포벽 물질인 NDF와 ADF는 1,555~1,674, 2,294 nm (Williams, 1987) 근처에서 흡수가 주로 일어난다고 보고 하였다. 한편 각 성분별 근적외선 흡수 스펙트럼은 연구자들에 따라 조금씩 차이를 보이는데 파장대역의 적용 범위는 근적외선분광기 또는 기기조건 변화 등에 따라 ± 20 nm의 차이를 보인다고 보고 하였다 (Garcia-Cuidad et al., 1993).

근적외선 분광기의 재현 및 반복성은 우수한

편이지만 항상 같은 스펙트럼을 얻는 것은 현실적으로 불가능하고 측정된 근적외선 흡수 스펙트럼은 성분별 흡수피크(peak)들이 넓고 중첩되어 있으며 시료의 밀도, 온도, 입자크기 등의 차이로 인한 산란차에 의해 바탕선의 변화가 발생하게 된다. 이러한 변화는 검량식 작성 시 많은 오차를 유발하는데 스펙트럼 수 처리 방법(미분법)은 바탕선의 변동 및 흡광도의 방해요인으로 인한 오차를 보정해주고, 검량식을 안정하게 하여 정량 및 정성분석의 필수적인 도구로 이용되어진다 (Hruschka, 1987; Shenk and Westhaus, 1991b; Garcia-Cuidad et al., 1993).

2. 이탈리아 라이그라스 사일리지의 이화학적 특성

이탈리안 라이그라스 사일리지의 품질평가를 위한 근적외선 검량식 작성에 이용되어진 시료 집단(Calibration set)의 화학적 조성분의 범위는 Table 1에서 보는 바와 같다. 수집된 시료집단의 수분 함량은 평균 57.3%, NDF 함량은 평균 60.9%, 조단백질 함량은 평균 8.2%, TDN 함량은 58.0%로 나타났다. 각 성분에 대한 표준편차는 수분 함량과 RFV가 높게 나타났으며 젖산함량과 pH 값이 상대적으로 낮게 나타났다. 일반적으로 양질 사일리지의 적정 수분 함

Table 1. The range of chemical composition and fermentation quality for collected Italian ryegrass silage (calibration set)

Constituent	n	Min.	Max.	Average	Standard deviation
Moisture (%)	266	19.7	79.6	57.3	10.4
Acid detergent fiber (ADF, %)	266	33.2	48.2	39.6	3.2
Neutral detergent fiber (NDF, %)	266	50.9	74.2	60.9	4.8
Crude protein (%)	266	4.6	19.5	10.8	3.7
Crude ash (%)	240	4.4	14.6	8.2	1.9
pH (1:5)	267	3.8	8.7	4.9	1.2
Lactic acid (%)	257	0.07	2.43	1.2	0.7
Total digestible nutrients (TDN, %)	266	51.3	63.1	58.0	2.5
Relative feed value (RFV)	266	64.4	115.2	89.3	10.5

량은 60~65% 정도로 알려져 있는데 본 연구에서 사용되어진 이탈리아 라이그라스의 평균 수분함량은 다소 낮은 것으로 나타났으나 표준편차가 상대적으로 크게 나타나 다양한 수분함량의 시료가 수집된 것으로 판단되어진다. 사일리지의 발효품질을 평가할 수 있는 pH와 젖산함량의 범위는 각각 3.8~8.7, 0.07~2.43%로 다른 성분에 비해 작은 것으로 나타났으며 시료별 함량차이가 작은 것으로 나타났다. Valdes 등(1987)은 예측 정확성이 우수한 검량식을 개발하기 위해서는 검량식 작성을 위한 모집단의 중요성을 강조하였는데, 모집단은 넓은 범위와 고른 분포를 가지고 있어야 한다고 보고하였다. 또한 넓은 범위를 가진 검량식 작성 모집단이라고 할지라도 각 성분에 대한 분포빈도가 고르지 못하면 그 만큼 측정 능력이 떨어지게 된다.

3. 검량식 작성 및 검증

이탈리안 라이그라스 원물 사일리지의 근적외선 스펙트럼을 측정하여 얻은 흡광도 스펙트럼과 실험실 습식 분석치 간에 중회귀분석을

통해 작성된 검량식과 검증결과는 Table 2와 Fig. 2에서 보는 바와 같다. 수집된 사일리지를 토대로 작성된 검량식의 평가는 검량식 결정계수 (R^2), SEC (Standard Error of Calibration) 및 SECV (Standard Error of Cross Validation) 가 이용되어지는데 결정계수 (R^2)는 높을수록 우수한 검량식이고 SEC와 SECV는 낮을수록 우수한 검량식이라고 하였다 (Shenk and Westerhaus, 1991a; Adesogan et al., 1998).

이탈리안 라이그라스 원물 사일리지의 수분함량에 대한 검량식 작성 결과는 검량식 작성 시 표준오차(SEC)가 0.94% ($R^2=0.99$)로 매우 우수한 정확성을 보였으며 작성된 검량식을 상호검증(SECV)한 결과 1.27% ($R^2=0.98$)로 근적외선분광기가 분석한 값과 실험실에서 분석한 분석치와 비교한 결과 정확성이 매우 높게 나타났다. ADF, NDF 및 조단백질 함량 평가를 위해 개발된 검량식의 상호검증(SECV) 결과는 각각 1.26% ($R^2=0.88$), 2.0% ($R^2=0.84$) 및 0.96% ($R^2=0.93$)으로 나타내었으며 사일리지에 흡과 같은 이물질의 혼입 여부를 판정하기 위해 개발된 조회분 함량 평가에 대한 검량식 개발 결과는 다소 낮은 정확성(SECV 0.72%, $R^2=0.62$)

Table 2. The calibration and validation statistics for the prediction of chemical composition and fermentation quality of Italian ryegrass silages

Constituent	n	Calibration		Validation	
		SEC [†]	R^2	SECV [‡]	R^2
Moisture (%)	218	0.94	0.99	1.27	0.98
Acid detergent fiber (ADF, %)	246	0.87	0.92	1.26	0.88
Neutral detergent fiber (NDF, %)	227	1.52	0.90	2.00	0.84
Crude protein (CP, %)	225	0.74	0.96	0.96	0.93
Crude ash (%)	168	0.67	0.78	0.72	0.62
pH (1:5)	239	0.41	0.85	0.56	0.78
Lactic acid (%)	246	0.18	0.92	0.31	0.81
Total digestible nutrients (TDN, %)	246	0.87	0.92	1.26	0.88
Relative feed value(RFV)	241	3.25	0.90	4.46	0.82

[†] Standard error of calibration, [‡] Standard error of cross validation

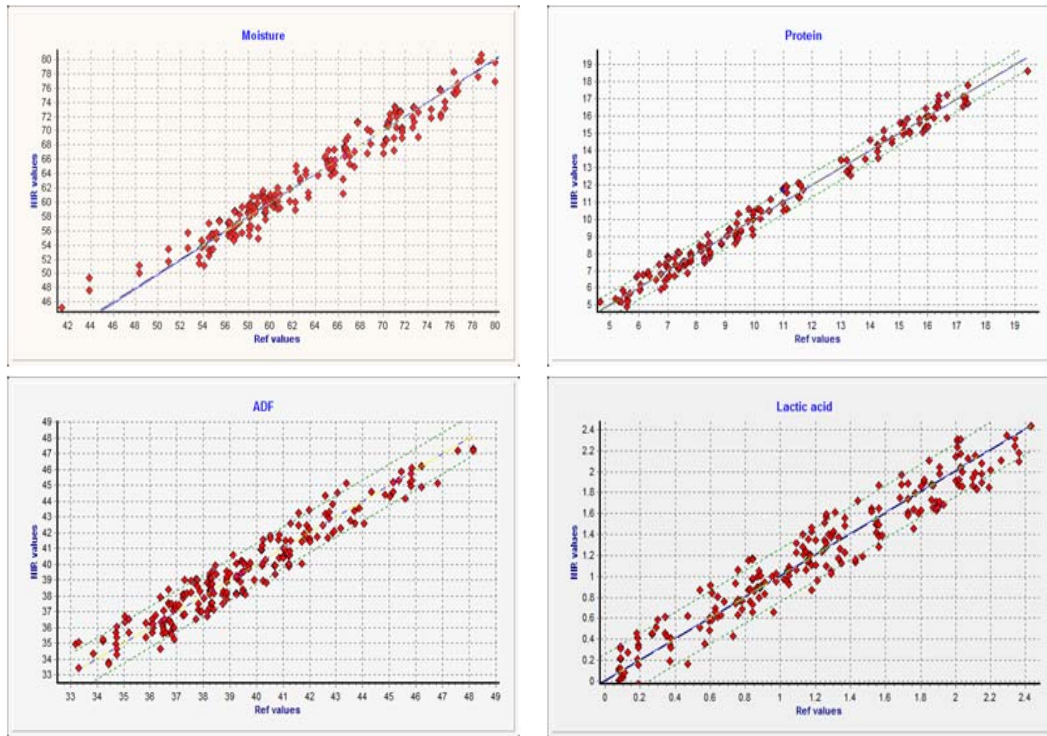


Fig. 2. Relationships between laboratory determined and NIRS predicted moisture, protein, ADF and lactic acid values of Italian ryegrass silages.

을 나타내었다. 일반적으로 무기물은 근적외선 대역에서 흡수가 일어나지 않아 측정이 불가능한 것으로 알려졌으나 (Whetsel, 1968) 근적외선 분광법을 이용하여 무기물 함량의 분석에 대한 성공사례가 많은 초종에서 보고되고 있다, Clark 등 (1987)에 의하면 일반적으로 식물체 조직 내의 무기물은 단독으로 존재하지 않고 유기물과 결합되어 존재하기 때문에 유기물과의 결합에 대한 물리성을 측정함으로써 가능하다고 보고하였다.

사일리지의 발효품질의 주요 평가항목인 pH와 젖산함량 평가에 대한 검량식 개발 결과 (SEC)는 각각 0.41 ($R^2=0.85$), 0.18% ($R^2=0.92$)로 나타났으며 개발된 검량식의 상호 검증 결과 (SECV)는 각각 0.56 ($R^2=0.78$), 0.31% (0.81)로 개발된 검량식 개발 시 오차보다 상호검증결과가 더 높게 나타났다. Sørensen (2004)은 근적외선 분광법을 이용하여 혼과목초와 옥수수 원물

사일리지의 pH와 젖산함량을 분석한 결과 (SECV) 혼과목초는 각각 0.13 ($R^2=0.91$, pH), 0.84% ($R^2=0.93$, 젖산)로 분석이 가능하였으며 옥수수 사일리지는 0.08 ($R^2=0.62$, pH), 0.47% ($R^2=0.91$, 젖산)로 분석이 가능함을 보고하였다. 이상의 연구결과를 종합해보면 근적외선분광법은 이탈리아 라이그라스 사일리지를 건조나 분쇄과정을 거치지 않고 바로 원물상태로 사료가치와 발효품질을 신속하게 평가할 수 있는 분석방법으로 판단되며 본 기술을 현장에서 활용하기 위해서는 다양한 시료 확보와 지속적인 검량식 갱신작업이 이루어져야 한다고 생각된다.

IV. 요 약

본 연구는 근적외선분광법의 현장 이용성 및 이탈리아 라이그라스 원물 사일리지의 신속한 품질평가를 위한 근적외선 검량식을 개발하기

위하여 전국에서 이탈리아인 라이그라스 사일리지 약 450여 점을 수집하였다. 각각의 시료는 근적외선 분광기를 이용하여 스펙트럼을 측정 한 후 측정된 스펙트럼과 실험실 분석값 간에 상관관계를 이용한 다변량회귀분석법을 통하여 검량식을 유도한 다음 각 성분별로 예측 정확성을 평가하였다. 이탈리아인 라이그라스 원물 사일리지의 수분 함량에 대한 검량식 개발 결과는 검량식 작성시 표준오차(SEC)가 0.94% ($R^2=0.99$)로 매우 우수한 정확성을 보였으며 개발된 검량식의 상호검증(SECV) 결과는 1.27% ($R^2=0.98$)로 나타났다. ADF, NDF 및 조단백질 함량 평가를 위해 개발된 검량식의 상호검증(SECV) 결과는 각각 1.26% ($R^2=0.88$), 2.0% ($R^2=0.84$) 및 0.96% ($R^2=0.93$)으로 나타났으며 조회분함량 평가에 대한 검량식 개발 결과는 다소 낮은 정확성(SECV 0.72%, $R^2=0.62$)을 나타내었다. 사일리지의 발효품질의 주요 평가항목인 pH와 젖산함량 평가에 대한 검량식 개발 결과(SEC)는 각각 0.41 ($R^2=0.85$), 0.18% ($R^2=0.92$)로 나타났으며 개발된 검량식의 상호검증 결과(SECV)는 각각 0.56 ($R^2=0.78$), 0.31% (0.81)로 나타났다.

V. 인 용 문 헌

- Adesogan, A.T., E. Owen and D.I. Givens. 1998. Prediction of the *in vivo* digestibility of whole crop wheat from *in vitro* digestibility, chemical composition, *in situ* rumen degradability, *in vitro* gas production and near infrared reflectance spectroscopy. Anim. Feed Sci. Technol. 74:259-272.
- ANKOM Technology. 2005a. Method for determining neutral detergent fiber. ANKOM Technology, Fairport, NY. http://www.ankom.com/09_procedures/procedures2.shtml. Accessed May 8, 2005.
- ANKOM Technology. 2005b. Method for determining acid detergent fiber. ANKOM Technology, Fairport, NY. http://www.ankom.com/09_procedures/procedures1.shtml. Accessed May 8, 2005.
- AOAC. 1990. Official Methods of Analysis, 15th ed. Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC.
- Baker, C.W., D.I. Givens and E.R. Deaville. 1994. Prediction of organic matter digestibility *in vivo* of grass silage by near infrared reflectance spectroscopy: effect of calibration method, residual moisture and particle size. Anim. Feed Sci. Technol. 50: 17-26.
- Clark, D.H., H.F. Mayland and R.C. Lamb. 1987. Mineral analysis of forages with near IR reflectance spectroscopy. Agron. J. 79: 485-490.
- Deaville and Flynn. 2000. Near infrared reflectance spectroscopy: An alternative approach to forage quality evaluation. In Givens et al. 2000. Forage evaluation in animal nutrition. Page 201. CABI, Wallingford.
- Fussel, R.J and D.V. McCalley. 1987. Determination of volatile fatty acids (C2-C5) and lactic acid in silage by gas chromatography. Analyst. 112:1213-1216.
- Garcia-Cuidad, A., B. Garcia-Criado, M.E. Pérez-Corona, B.R. Vázquez de Aldana and A.N. Ruano-Ramos. 1993. Application of near-infrared reflectance spectroscopy to chemical analysis of heterogeneous and botanically complex grassland samples. J. Sci. Food Agric. 63:419-426.
- Geladi, P., D. MacDougall and H. Martens. 1985. Linearization and scatter-correction for near-infrared reflectance spectra of meat. Appl. Spectrosc. 39:491-500.
- Givens, D.I., J.L. De Boever and E.R. Deaville. 1997. The principles, practices and some future applications of near infrared spectroscopy for predicting the nutritive value of foods for animals and humans. Nutr. Res. Rev. 10:83-114.
- Goering, H.K. and P.J. Van Soest. 1970. Forage Fiber Analysis. Agric. Handb. 379. US Department of Agriculture, Washington, DC.
- Gordon, F.J., K.M. Cooper, R.S. Park and R.W.J. Steen. 1998. The prediction of intake potential and organic matter digestibility of grass silages by near infrared spectroscopy analysis of undried samples. Anim. Feed Sci. Technol. 70:339-351.

14. Holland, C., W. Kezar, W.P. Kautz, E.J. Lazowski, W.C. Mahanna, and R. Reinhart. 1990. The Pioneer Forage Manual-A Nutritional Guide. Pioneer Hi-Bred Int. Inc., Des Moines, IA.
15. Hruschka, W.R. 1987. Data analysis: wavelength selection methods. In P. Williams and K. Norris (eds.) Near-Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries. St. Paul, MN: Am. Assoc. of Cereal Chemists Inc., p. 35-55.
16. Park, R.S., R.E. Agnew, F.J. Gordon and R.W.J. Steen. 1998. The use of near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) on undried samples of grass silage to predict chemical composition and digestibility parameters. Anim. Feed Sci. Technol. 72:155-167.
17. Reeves III, J.B and T.H. Blosser. 1989. Near infrared reflectance spectroscopy for analyzing undried silage. J. Dairy Sci. 72: 79-88.
18. Reeves, J.B. and T.H. Blosser. 1991. Near infrared spectroscopic organic matter digestibility *in vivo* of grass silage by near infrared reflectance spectroscopy: Effect of calibration method, residual analysis of undried silages as influenced by sample grind, presentation method, and spectral region. J. Dairy Sci. 74:882-895.
19. Shenk, J.S and M.O. Westerhaus. 1991a. Population definition, sample selection, and calibration procedures for near infrared reflectance spectroscopy. Crop Sci. 31:469-474.
20. Shenk, J.S and M.O. Westerhaus. 1991b. Population structuring of near infrared spectra and modified partial least squares regression. Crop Sci. 31:1548-1555.
21. Sørensen, L.K. 2004. Prediction of fermentation parameters in grass and corn silage by near infrared spectroscopy. J. Dairy Sci. 87(11):3826-35.
22. Valdes, E.V., R.B. Hunter and L. Pinter. 1987. Determination of quality parameters by near infrared reflectance spectroscopy in whole-plant corn silage. Can. J. Plant Sci. 67:747-754.
23. Whetsel, K.B. 1968. Near infrared spectrophotometry. Appl. Spectros. Rev. 2:1-67.

(Received August 16, 2012/Accepted September 19, 2012)